

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA STAVEBNÍ MECHANIKY

**Statická analýza lanové konstrukce -
účinky lan na stožáry elektrického vedení**

Static analysis of the cable structure - cable actions on electricity pylons

Autorka diplomové práce:

Bc. Zdeňka Neuwirthová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ivan Kološ, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zdeňka Neuwirthová**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožáry elektrického vedení
Static analysis of the cable structure - cable actions on electricity pylons

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Proveďte statickou analýzu vodičů a lan venkovního elektrického vedení se zaměřením na účinky lan na konstrukce stožárů.

Pro typické případy zatížení a uložení úlohu algoritmizujte ve formě výpočetní pomůcky.

Seznam doporučené odborné literatury:

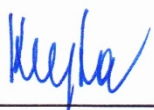
- [1] ČSN EN 1990 ed. 2 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- [2] Aktuálně platné normy pro navrhování a provádění staveb (třída 73 dle katalogizace Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví). <http://seznamcsn.unmz.cz>
- [3] ČSN EN 50341-1 Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV - Část 1: Všeobecné požadavky - Společné specifikace
- [4] ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení*. Brno, 2015.
- [5] KADLČÁK, J. *Statics of Suspension Cable Roofs*. A.A. Balkema, 1995
- [6] BUCHHOLDT H.A. *An Introduction to Cable Roof Structures*. Thomas Telford, 1999

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

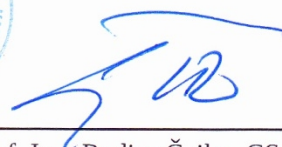
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivan Kološ, Ph.D.**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30. 11. 2016

.....

Podpis

Prohlášení

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny informačním systémem VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 30. 11. 2016

.....

Podpis

Anotace

Bc. NEUWIRTHOVÁ Z., Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožáry elektrického vedení

VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, Ostrava 2016

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ivan Kološ, Ph.D.

Počet stran textu: 91

Počet stran příloh: 12

Tato práce se zabývá statickou analýzou vodičů venkovního elektrického vedení se zaměřením na účinky lan na konstrukce stožárů. Věnuje se také příkladu využití známého průhybu kabelu pro zjištění velikosti zatížení působícího na pylony. Úloha byla algoritmizována ve formě výpočtové pomůcky v programu Microsoft Excel 2007, ke které byl zpracován manuál pro snadné využití programu. Správnost řešení byla ověřena na řešených příkladech a pomocí modelu využívajícího metody konečných prvků, vytvořeného v programu Scia Engineer 16.1.

Klíčová slova

Elektrické vedení, stožár, pylon, lano, nesouměrná řetězovka, mechanika vedení

Annotation

Bc. NEUWIRTHOVÁ Z., Static analysis of the cable structure - cable actions on electricity pylons VŠB-TU Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Ostrava 2016

Diploma Thesis, supervisor: Ing. Ivan Kološ, Ph.D.

Number of pages: 91

Number of appendices pages: 12

This thesis is about a mechanical analysis of power lines with special attention to the load of electricity pylons using the sag of the cables. An algorithm was created for typical cases in Microsoft Excel 2007 with application guide. The algorithm was verified by solved examples and by a numerical model designed in Scia Engineer 16.1.

Key words

Cable, catenary, rope, pylons, utility pole, transmission towers, mechanical analysis

Seznam zkratk

ČR	Česká republika
MKP	Metoda konečných prvků

Seznam použitého značení

a [-]	Parametr řetězovky, svislá vzdálenost nejnižšího místa řetězovky od počátku souřadného systému
A [mm ²]	Plocha
B^2 [-]	Součinitel odezvy pozadí
c_{dir} [-]	Součinitel směru větru
$c_{0(z)}$ [-]	Součinitel orografie
c_p [-]	Součinitel tlaku větru
$c_{r(z)}$ [-]	Součinitel drsnosti terénu
c_{season} [-]	Součinitel ročního období
C_1, C_2 [-]	Integrační konstanty
C_c [-]	Součinitel aerodynamického odporu vodiče
d [m]	Průměr vodiče
f_m [m]	Maximální průhyb - vzdálenost nejnižšího místa řetězovky od výše uloženého podpůrného bodu
F_k [kN]	Charakteristická hodnota zatížení
g_1 [N/m]	Vlastní tíha vodiče
g_k, q_k [kgm ⁻²]	Charakteristická hodnota zatížení
G_c [-]	Součinitel rozpětí
h [m]	Referenční výška (při zatížení větrem)
h [m]	Rozdíl výškového uložení podpěrných bodů řetězovky (při výpočtech řetězovky)
H [kN]	Vodorovná složka síly
i [mm]	Poloměr setrvačnosti
I [mm ⁴]	Moment setrvačnosti
I_k [N/m]	Charakteristické zatížení námrazou
I_R [N/m]	Referenční zatížení námrazou
$I_{v(h)}$ [-]	Intenzita turbulence

k_r [-]	Součinitel terénu
l [m]	Vzdálenost podpůrných bodů řetězovky
l_n [m]	Šikmá vzdálenost podpor
l_s [m]	Délka lana
L_1, L_2 [m]	Délky dvou sousedních rozpětí
M [kNm]	Ohybový moment
N [kN]	Normálová síla
$q_{h(h)}$ [N/m ²]	Střední tlak větru
q_{wcl} [N/m]	Návrhové zatížení větrem na jednotku délky vodiče
Q [kN]	Síla působící na podpěrný bod ve svislém směru
R_a [kN]	Svislá reakce
S [m]	Plocha průřezu
T [K]	Teplota prostředí
v_b [m/s]	Základní rychlost větru
$v_{b,0}$ [m/s]	Výchozí základní rychlost větru
V [kN]	Posouvající síla
w_k [kgm ⁻²]	Charakteristická hodnota tlaku větru
x_{B1}, x_{A2} [m]	Vodorovná vzdálenost mezi vrcholem řetězovky a podpěrným bodem
z [-]	Přetížení vodiče
α [K ⁻¹]	Koeficient tepelné roztažnosti
γ_g [-]	Dílčí součinitel stálého zatížení
ρ [kg/m ³]	Hustota vzduchu
$\theta_1/2$ [°]	Úhel změny trasy
$\theta_2/2$ [°]	Úhel změny trasy
ϕ [°]	Směr působení
Ψ_{wc} [-]	Součinitel kombinace zatížení
σ [MPa]	Napětí ve vodiči

Obsah

1	Úvod	11
2	Návrh elektrického vedení	12
2.1	Mechanika vodiče	12
2.1.1	Faktory ovlivňující průvės vodiče	12
2.2	Typy stožárů a požadavky pro návrh	14
2.2.1	Nejpoužívanější materiály pro stavbu stožárů	14
2.2.2	Dělení stožárů podle konstrukce	16
2.2.3	Stožáry podle jejich umístění na trati vedení	18
3	Mechanika venkovního vedení	19
3.1	Průvėsová křivka vodiče	19
3.1.1	Odvození průhybové křivky	19
3.1.2	Další parametry řetězovky	22
3.1.3	Obrácená úloha	24
3.2	Stavová rovnice	28
3.2.1	Odvození stavové rovnice	29
4	Zatížení vedení	30
4.1	Požadavky na elektrické vedení	30
4.2	Stálá zatížení	31
4.3	Proměnná zatížení	32
4.3.1	Zatížení větrem	32
4.3.2	Zatížení námrazou	39
4.3.3	Nerovnoměrné zatížení námrazou	42
4.3.4	Kombinované zatížení větrem a námrazou	43
4.3.5	Účinky teploty	45
4.4	Mimořádná zatížení	46
4.4.1	Doplňková zabezpečovací opatření	46
4.4.2	Laviny, sesuvy sněhu a zemětřesení	46
5	Manuál pro uživatele	47

5.1	Zadání vstupních parametrů	48
5.2	Výpočet nesouměrné řetězovky.....	50
5.3	Výpočet zatížení větrem.....	53
5.4	Výpočet zatížení námrazou	58
5.5	Kombinace zatížení větrem a námrazou.....	59
5.6	Stavová rovnice.....	62
5.7	Výpočty účinků jednotlivých zatížení.....	63
5.1	Výsledky	66
6	Praktická ukázka na řešeném příkladu.....	70
6.1	Varianta A.....	70
6.2	Varianta B.....	80
7	Ověření funkčnosti programu pomocí metody konečných prvků.....	82
8	Závěr.....	87
	Literatura	89
	Použitý software.....	90
	Seznam příloh.....	90

1 Úvod

Významným prvkem krajiny jsou nepřehlédnutelné stožáry s vodiči elektrického vedení. Podobně jako jiné, často se opakující konstrukce, jsou i elektrické stožáry předmětem dlouhodobého vývoje, jehož součástí je návrh a optimalizace elektrického vedení tak, aby bylo co nejekonomičtější a nejefektivnější. S tím souvisí např. vývoj materiálu, návrh optimální vzdálenosti polí nebo opatření proti havárii.

Jeden ze způsobů, jak předcházet haváriím na trati vedení, jsou pravidelné revize stožárů a jejich údržba. V některých případech se provádí statický výpočet únosnosti stávajícího stožáru se zohledněním oslabení profilů. Základním údajem potřebným pro výpočet jsou informace o zatížení stožáru, na kterém se podílí nejen účinky lan, ale také klimatické vlivy. A právě informace o účincích lan není snadné zjistit. Mohou se použít zatížení z původního statického návrhu, pokud se dochoval. Ale můžeme si být jisti, že je i po letech napětí v lanech stejné jako v době návrhu a realizace konstrukce? V případě, že se chceme přesvědčit o skutečné napjatosti lana, nebo pokud nemáme dostupnou dokumentaci, můžeme vypočítat napětí z hodnot, které známe nebo dokážeme zjistit.

Vstupními údaji pro výpočet jsou: typ lana, geometrie vedení, průhyb vodiče a teplota prostředí. Na základě okrajových podmínek lze pomocí průhybové křivky vodiče, tzv. řetězovky, zjistit horizontální napětí v laně a následně všechny působící síly. Toto jsou informace o aktuálním zatížení stožáru v době měření. Odtud lze pomocí stavové rovnice vyjádřit síly působící na stožár od jednotlivých zatížení.

Výpočet je poměrně obsáhlý a časově náročný, proto se má diplomová práce věnuje algoritmizaci úlohy ve formě výpočtové pomůcky v tabulkovém procesoru Microsoft Excel [18]. Cílem je vytvořit nástroj, který usnadní analýzu účinků sil při kontrole vedení. Výrazně se tak sníží čas potřebný k výpočtu, a to zejména u nesymetrického vedení trasy, které se může projevit lomem trasy nebo uložení podpěrných bodů v rozdílné výšce, popřípadě jejich kombinací.

2 Návrh elektrického vedení

2.1 Mechanika vodiče

Přímé vedení lana bez jakéhokoliv průhybu je nevýhodné hned ze dvou důvodů. Prvním důvodem jsou příliš velké požadavky na odolnost lana z hlediska mechanického napětí, druhým velké koncové síly, což vede k potřebě robustnější stožárové konstrukce, aby vyhověla meznímu stavu únosnosti. Z toho vyplývá, že návrh takového vedení by byl nejen neekonomický, ale také velmi nákladný.

Naproti tomu nedostatečné předpětí lana má za následek průvěs, který sice neklade zvýšené požadavky na únosnost lana a nosné konstrukce, ale potřebná výška stožáru roste, aby byla zajištěna minimální vzdálenost vodiče od země, v důsledku čehož se zvyšuje pracnost i cena. Proto je potřeba najít optimální řešení.

Při návrhu elektrického vedení se vychází z hodnoty maximálního dovoleného namáhání lana, které nesmí být překročeno po celou dobu životnosti. Z tohoto důvodu vodič posuzujeme z hlediska mechanického namáhání pro předepsané stavy počasí dle ČSN EN 50341 [4]. Vztah mezi mechanickým napětím vodiče a průhybem je nepřímo úměrný [8], a jelikož známe vztah vyjadřující tuto závislost, dokážeme vypočítat průvěs lana. Třebaže, na rozdíl od jiných nosných konstrukcí, není pro tento případ předepsaná limitní hodnota průhybu, klíčová je vzdálenost kabelu od země, která závisí především na typu vedení a kategorii terénu. Na základě těchto informací snadno určíme potřebnou výšku stožáru.

2.1.1 Faktory ovlivňující průvěs vodiče

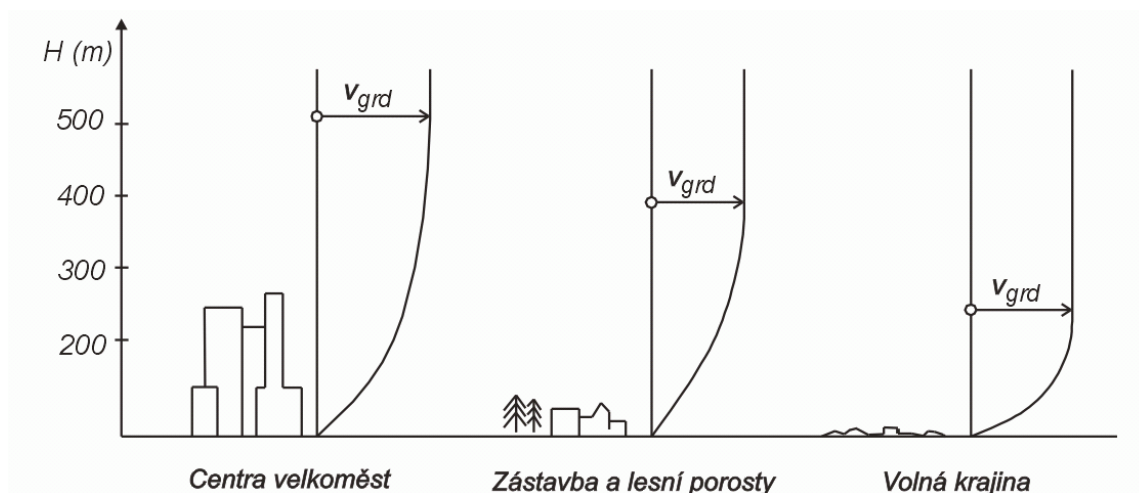
Existuje několik faktorů, které velmi významně ovlivňují průvěs vodiče elektrického vedení. Jsou to hlavně tyto činitele:

- Vlastní tíha lana
- Vzdálenost podpor
- Geografické umístění

Stěžejní vliv má vlastní tíha lana, neboť průvěs je přímo úměrný vlastní tíze vodiče [8]. Čím větší je tíha vodiče, tím větší je síla, která působí na lano, a proto je větší také průvěs.

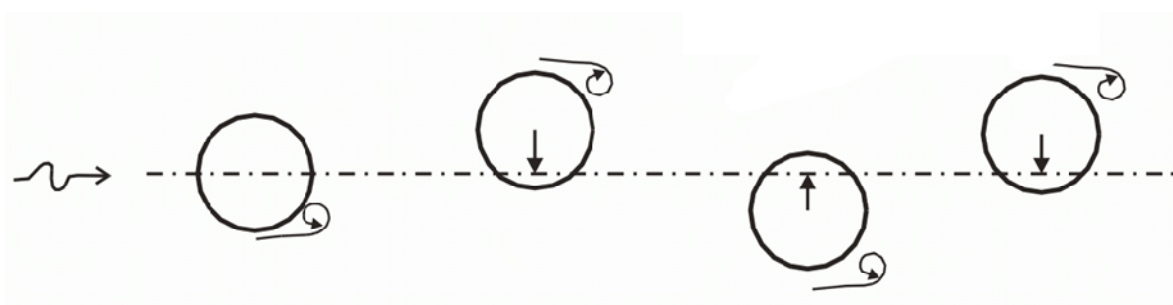
Významný dopad na průhyb má také vzdálenost podpor. Za předpokladu, že hodnota tahové síly ve vodiči bude zachována, je nezbytné, aby se při zvětšující vzdálenosti podpor úměrně zvětšoval také průhyb.

Na geografickém umístění vedení závisí nejen venkovní teplota, ale také kategorie větrné a námrazové oblasti. Teplota ovlivňuje délku vodiče teplotní roztažností, která způsobuje, že se stoupající a klesající teplotou vzduchu se vodič prodlužuje a zkracuje. Vlivem drsnosti zemského povrchu dochází ke zvětšování rychlosti větru v závislosti na výšce a to až do tzv. gradientní výšky. Nad touto výškou má vzdušný proud přibližně konstantní střední rychlost (Obr. 1) [1].



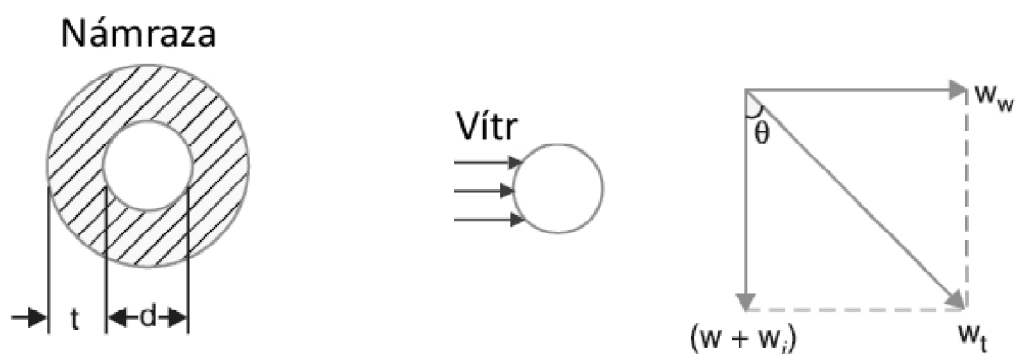
Obr. 1 – Gradientní rychlost větru [1]

Trať velmi vysokého napětí bývá umístěná až několik desítek metrů nad zemí, což má za následek výrazné účinky vlivem působení větru. Nejhorší účinek vzniká za předpokladu, že vítr působí kolmo na vodič. Za těchto okolností totiž dochází ke kmitání lan vlivem odtrhávání Karmánových vírů (Obr. 2).



Obr. 2 – Příčné kmitání lan [1]

Působení větru zapříčiňuje, že výslednice zatížení není svislá, jako za normálních okolností, ale odklání se svislice o úhel θ , jak je patrné z Obr. 3. V zimním období dochází ke vzniku přídavného zatížení v důsledku působení námrazy, která rovnoměrně obaluje vodič (Obr. 3).



Obr. 3 – Zatížení povětrnostními vlivy [8]. Vlevo vodič vystavený účinkům námrazy v řezu, kde d je průměr vodiče a t je tloušťka námrazy. Uprostřed je patrný kritický směr působení větru na lano v řezu. Napravo pak znázornění vektorů působícího zatížení, kde w značí vlastní tíhu vodiče, w_i přitížení od námrazy, w_w zatížení větrem a w_t výslednici zatížení.

2.2 Typy stožárů a požadavky pro návrh

2.2.1 Nejpoužívanější materiály pro stavbu stožárů

Dřevo

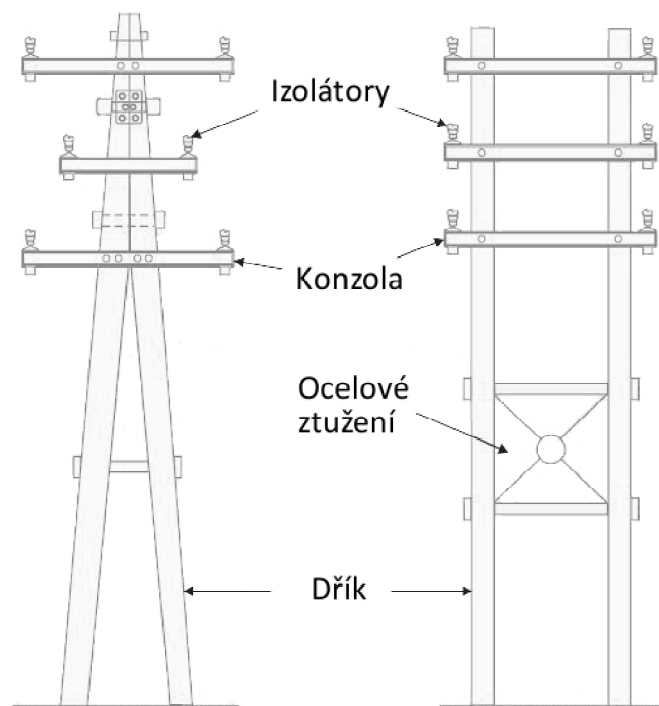
Dřevo je ve světě nejčastěji používaný materiál, především díky jeho dostupnosti, ale nízké pořizovací náklady i rychlá a snadná výstavba jsou neméně oceňovány. Mezi nevýhody se řadí omezená výška sloupů, z toho důvodu se používá na tratě s menším rozpětím polí (kolem 50 m), a nevelká odolnost vůči vnějším vlivům, což je příčinou vysokých nákladů na údržbu a kratší životnosti, která se při správné údržbě pohybuje okolo 20-30 let [12].

Pokud stožáry slouží k rozvodu vedení nízkého napětí, využívá se obvykle jednoduchých sloupů nebo stožáru zdvojeného, který se skládá ze dvou sloupů vedle sebe. Navzdory tomu se dřevěné stožáry využívají také na rozvod vedení vysokého napětí. Pro tento účel lze realizovat také stožáry s náročnějším konstrukčním řešením (Obr. 4).

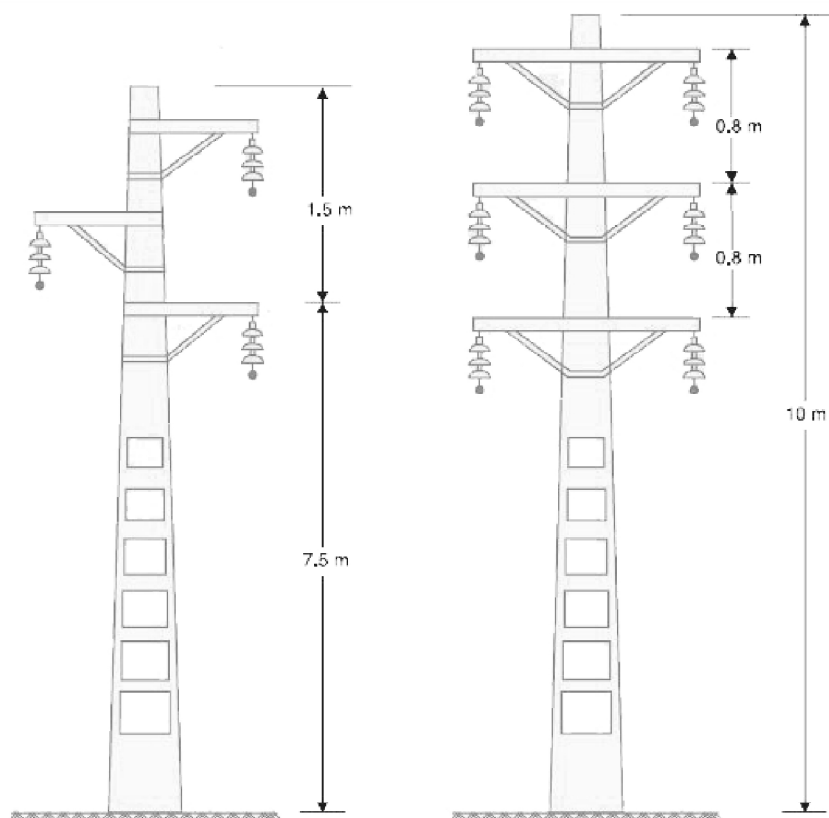
Železobeton a předpjatý beton

K rozšířenému použití betonových stožárů došlo po druhé světové válce. Stožáry z betonu mají široké spektrum použití nejen z důvodu nízkých pořizovacích nákladů, ale zejména díky dobrým mechanickým vlastnostem, což umožňuje jejich využití i pro větší rozpětí. Mají v podstatě nulové náklady na údržbu a životnost zhruba 30 let. Nevýhodou pro použití železobetonu je hlavně masivní konstrukce, která výrazně zvyšuje náklady na

transport a sestavení stožáru. V takovém případě je vhodnější použít předpjatý beton, který umožňuje efektivnější využití materiálu, v důsledku čehož je konstrukce poměrně subtilní. Z toho vyplývá nejen úspora materiálu, ale také snadnější přeprava a montáž.



Obr. 4 - Dřevěné stožáry elektrického vedení. Nalevo typ „A“, napravo typ „H“ [8]



Obr. 5 – Ukázka betonových stožárů [8]

Ocel

Ocelové stožáry se nejčastěji vyskytují na trati velmi vysokého napětí. Mezi jejich výhody patří dlouhá životnost, výborné mechanické vlastnosti, odolnost proti klimatickým vlivům a tvarová variabilita. Nevýhodou však jsou vysoké provozní náklady a náročnost údržby, což zapříčiňuje potřeba stožáry pravidelně opatřovat ochrannými nátěry, aby se předcházelo korozi a degradaci materiálu a tím se prodloužila životnost konstrukce.

Ocelové stožáry bývají nejčastěji prováděny jako celistvé sloupy z trubek, profilované oceli, nebo jako příhradová konstrukce. Celistvé sloupy se používají na menších vzdálenostech tratí jako náhrada dřevěných či betonových sloupů.

Příhradové stožáry jsou u nás nejčastěji používané stožáry pro rozvod velmi vysokého napětí. Lze je snadno uplatnit tam, kde by byl jiný materiál neefektivní. Například při velké výšce stožáru, značné vzdálenosti podpor a také v případě velkého tahového namáhání pylonů. Příhradový stožár je výhodný také z logistického hlediska, neboť jej zpravidla není nutno převážet v celku. Bývá konstruován z menších dílců, které jsou v porovnání s výslednou konstrukcí lehké a snadno se přepravují. Montáž jednotlivých dílů se provádí až na staveništi.

Ostatní materiály

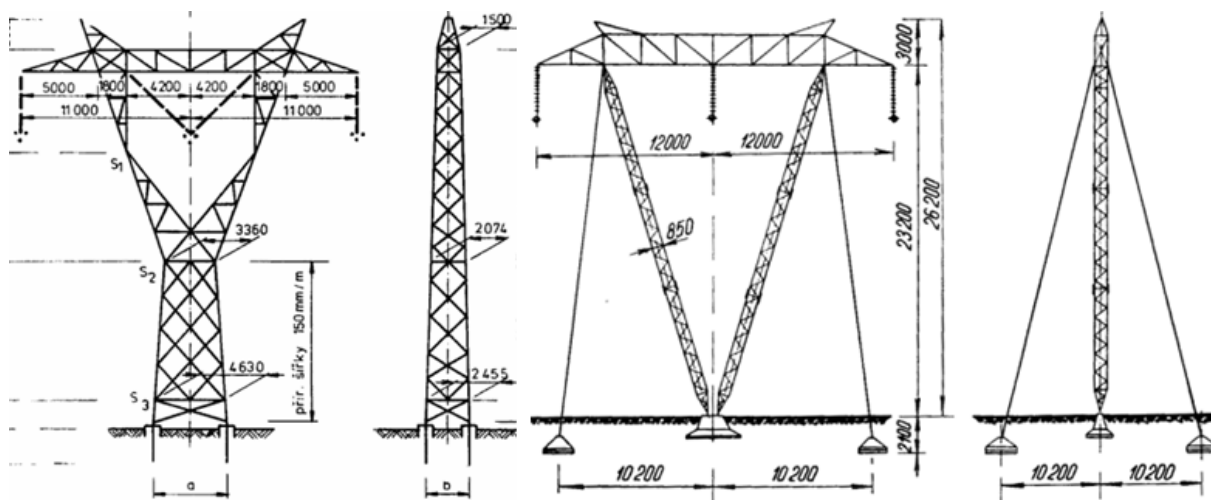
Mezi méně tradiční, avšak dostupné, lze řadit stožáry hliníkové, sklolaminátové nebo ocelobetonové (tj. z ocelových trubek vyplněných betonem).

2.2.2 Dělení stožárů podle konstrukce

Stožáry jsou ze statického hlediska obvykle tvořeny jako samonosné nebo kotvené pomocí lan (Obr. 6) [9]. Samonosné stožáry jsou vetknuté do základu, naproti tomu stožáry kotvené bývají obvykle koncipovány jako kyvná stojka a stabilitu zajišťují kotevní lana.

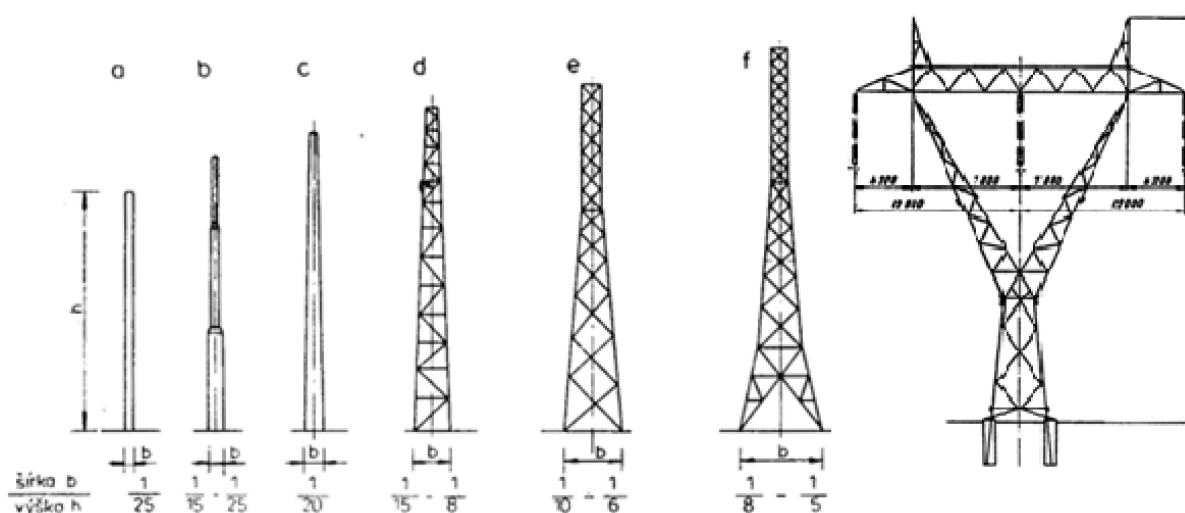
Kotvené stožáry jsou oblíbené převážně v USA a Kanadě, především díky úspoře materiálu (až o 20-30%), což zapříčiňuje nejen nižší cenu samotné konstrukce, ale také nižší náklady na přepravu. Za předpokladu, že je jako materiál zvolen méně tradiční hliník, lze výhodně využít vrtulník pro převoz materiálu do jinak nepřístupných oblastí. Nevýhodou kotvených stožárů jsou zvýšené požadavky na prostorovou náročnost (oblast potřebná pro kotvení lan se uvažuje kruhová a velikost poloměru může dosahovat až 80% výšky, proto

toto řešení není vhodné pro zastavěné oblasti) a kvalitu provedení stožáru, s mimořádným důrazem na správné napnutí kotevních lan.

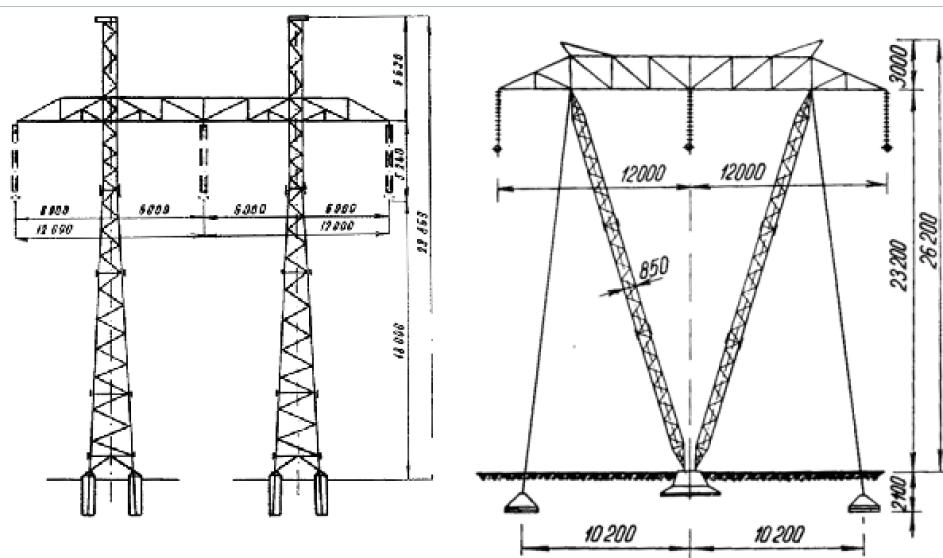


Obr. 6 – Stožáry elektrického vedení podle statického působení [10]. Nalevo je zobrazen přední a boční pohled na samonosný stožár (typu „kočka“). Napravo pak stožár kotvený.

Podle konstrukčního uspořádání můžeme stožáry rozdělit na jednodřívkové a portálové. Jednodřívkové stožáry se výjimečně realizují s kruhovým průřezem po výšce konstantním, odstupňovaným nebo lineárně proměnným (Obr. 7, varianty a-c). Nejčastěji jsou však konstruované jako čtyřboké příhradové konstrukce a to zejména z úhelníků (Obr. 7, Obr. 8 varianty d, e). Portálové stožáry mají nejčastěji tvar dvou svislých dřívků, které podpírají příčník. Tento stožár může být proveden také jako kotvený (Obr. 8).



Obr. 7 – Různé typy jednodřívkových stožárů [10]



Obr. 8 – Různé typy portálových stožárů [10]. Vlevo klasický, vpravo portálový kotvený.

2.2.3 Stožáry podle jejich umístění na trati vedení

Stožáry jsou děleny na nosné a výztužné. Liší se působením vzhledem k mechanice vedení. Nosné stožáry jsou dimenzovány pouze na přenos svislých zatížení, z čehož vyplývá, že v důsledku působení jiných sil může dojít k jejich kolapsu. Naproti tomu výztužné stožáry slouží nejen k přenosu svislých sil, ale také sil vodorovných a ohybových momentů.

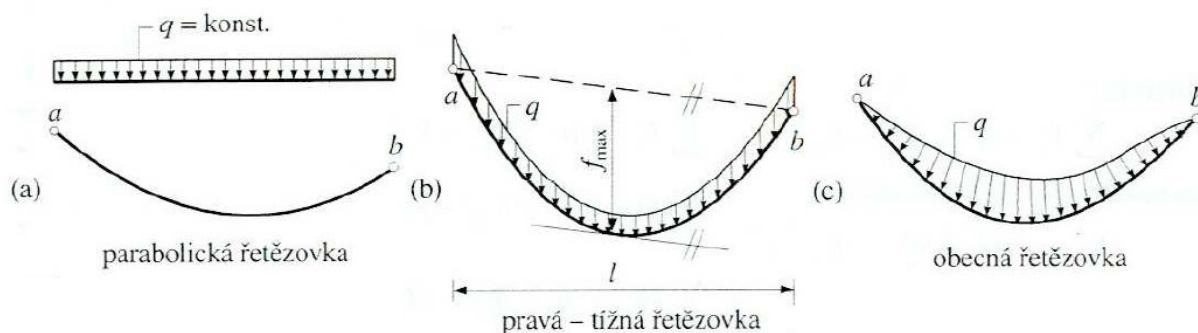
Při mimořádných okolnostech se vyskytuje riziko poškození elektrického vedení. To se může projevit dvěma způsoby: porušením lana nebo pádem stožáru. Pokud dojde k takové situaci, je nutno minimalizovat následky. Vzhledem k délce tratě je nutno dimenzovat vedení po částech a tím předcházet dominovému efektu. Z tohoto důvodu je nutno dimenzovat výztužné stožáry v průběhu celé tratě. Výztužné stožáry se umísťují v přímé trati co 3-5 km v závislosti na profilu trasy a s ohledem na to, zda byly pylony dimenzovány na kroucení vlivem přetržení vodiče. Kromě toho se výztužné stožáry umísťují v místech změny směru trati, v případě odboček, křížení a na jejím konci.

Je zřejmé, že existuje mnoho aspektů, které ovlivňují výběr nejvhodnějšího typu stožáru, ať jde o hledisko vedení trasy či konstrukční uspořádání a statické vedení. Významnou roli hraje náročnost výstavby, komplikace při dopravě i náklady, nejen pořizovací, ale i související s údržbou a opravami. Je nutno poznamenat, že jde o velmi náročný proces, během kterého je potřeba brát zřetel na velké množství atribut a vybrat co možná nevhodnější řešení.

3 Mechanika venkovního vedení

3.1 Průvěsová křivka vodiče

Vlákno zavěšené na dvou neposuvných bodech zaujme tvar řetězovky. Podle polohy, směru a intenzity zatížení se jedná o řetězovku parabolickou, tížnou a obecnou [13], (Obr. 9). Obecná řetězovka se však pro řešení vodičů elektrického vedení nevyužívá.



Obr. 9 Rovinné řetězovky [13]

Uvažujeme-li tíhu vodiče jako rovnoměrně rozdělenou po průmětu vlákna, bude mít jeho průhybová křivka tvar parabolické řetězovky. Pokud je rozpětí menší než 400 m a podpůrné body leží ve stejné výšce, je přesnost této aproximace dostatečná a lze ji bez problému využít.

Za předpokladu, že jsou podpory uloženy v různých výškových úrovních, je vhodnější použít tížnou řetězovku se zatížením rovnoměrně rozloženým po délce vlákna. Je nutno poznamenat, že u pravé (tížné) řetězovky vychází vztahy ve složitějším matematickém tvaru.

V případě, že jde o tzv. „plochou řetězovku“, která je definována poměrem $\frac{f_m}{l} < \frac{1}{10}$, (kde f_m je maximální průvės a l vzdálenost podpor) uvažujeme vlastní tíhu rozloženou stejným způsobem jako u parabolické řetězovky.

3.1.1 Odvození průhybové křivky

Protože cílem mé diplomové práce je vytvoření výpočtové pomůcky, není možno uvažovat zjednodušení parabolickou řetězovkou, jelikož by to vedlo k omezení platnosti řešení pouze pro rozpětí menší než 400 m. Z tohoto důvodu je při odvození uvažovaná průhybová křivka tížné řetězovky. Dále lze vycházet z předpokladu, že pro běžné použití se poměr $\frac{f_m}{l}$ pohybuje v rozmezí 0,01 – 0,02 [12], z čehož vyplývá, že se jedná o

tzv. „plochou řetězovku“, což má za následek značné matematické zjednodušení.

Při analytickém vyjádření průhybové křivky se vychází ze statických podmínek rovnováhy [13].

$$\sum F_{ix} = 0 : N \cdot \cos \varphi - H = 0 \quad (1)$$

$$N_x = N \cdot \cos \varphi = H = \text{konst.}$$

$$dN_x = 0$$

$$\sum F_{iz} = 0 : N \cdot \sin \varphi - Q = 0 \quad (2)$$

$$N_z = N \cdot \sin \varphi = Q = qs$$

$$dN_z = qds$$

Momentovou podmínku není možno použít, protože poloha výslednice zatížení Q není známa, je však možno použít podmínku dokonalé ohebnosti vlákna (3) (Obr. 10).

$$\tan \varphi = \frac{dz}{dx} = z' = \frac{N_z}{H} = \frac{qs}{H} \quad (3)$$

V dalším kroku bude provedena derivace výrazu (3). Jejím výsledkem je diferenciální rovnice průvřesové křivky vlákna (4).

$$\frac{d^2z}{dx^2} = z'' = \frac{1}{H} \cdot \frac{dN_z}{dx} = \frac{q}{H} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (4)$$

Délku elementu ds vyjádříme pomocí rovnice (4).

$$ds = \frac{H}{q} \cdot dz' \quad (5)$$

Nyní zavedeme předpoklad, že rozdíl mezi délkou elipsy úseku ds (Obr. 10) a délkou přepony trojúhelníku je zanedbatelný, z čehož plyne, že pro výpočet vzdálenosti lze využít Pythagorovu větu.

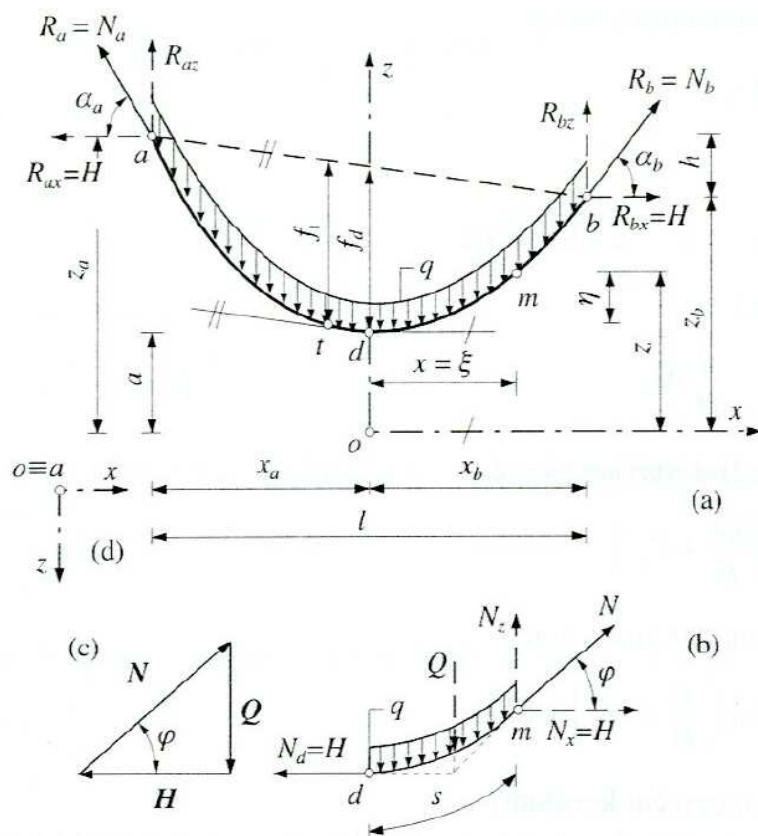
$$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2} = \sqrt{1 + z'^2} \cdot dx \quad (6)$$

Nyní vznikly dva rozdílné vztahy pro vyjádření stejné proměnné. Proto vztahy (5) a (6) porovnáme.

$$\frac{dz'}{\sqrt{1 + z'^2}} = \frac{q}{H} \cdot dx \quad (7)$$

Po separaci proměnných a integraci vztahu (7) je patrné, že vznikla obecná rovnice tečny.

$$z' = \sinh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) \quad (8)$$



Obr. 10 Tízná řetězovka [13]

Po následné integraci je získáno obecné vyjádření průvřesové křivky.

$$z = \frac{H}{q} \cdot \cosh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) + C_2 \quad (9)$$

Kde C_1 a C_2 jsou integrační konstanty. Lze je vypočítat pomocí okrajových podmínek, které je nutno dosadit do rovnic (8) a (9).

Počátek souřadného systému je volen tak, aby osa z procházela nejnižším bodem řetězovky a osa x bude posunuta dolů o parametr řetězovky a (Obr. 10), pak lze snadno definovat okrajové podmínky: $x = 0, y' = 0$ a $y = a$ a vyčíslit integrační konstanty.

$$0 = \sinh(0 + C_1) \Rightarrow C_1 = 0 \quad (10)$$

$$z = a = \frac{H}{q} \cdot \cosh\left((0 + 0) \cdot \frac{q}{H}\right) + C_2 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (11)$$

Integrační konstanty jsou dosazeny zpět do rovnic (8) a (9), ze kterých lze získat výsledný tvar průvřesové křivky (13) a rovnici sklonu tečny (14). Také došlo k zavedení substituce (12).

$$\frac{H}{q} = a \quad (12)$$

$$z(x) = a \cdot \cosh \frac{x}{a} \quad (13)$$

$$z'(x) = \sinh \frac{x}{a} \quad (14)$$

Funkce hyperbolického cosinu je rozvedena pomocí Taylorova polynomu (15). S využitím prvních dvou členů rozkladu lze získat rovnici pro parabolickou řetězovku (16).

$$z(x) = a \cdot (\cosh \frac{x}{a} - 1) = a \cdot \left[1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \frac{1}{4!} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^4 + \dots \right] - a \quad (15)$$

$$z(x) = a \cdot \left[1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 \right] - a = \frac{x^2}{2 \cdot a} \quad (16)$$

3.1.2 Další parametry řetězovky

Pro další výpočty je potřeba vyjádřit z_a a z_b (Obr. 10), čehož lze dosáhnout pomocí vzorce (13).

$$z_a = a \cdot \cosh \frac{x_a}{a} \quad ; \quad z_b = a \cdot \cosh \frac{x_b}{a} \quad (17)$$

Z geometrie řetězovky (Obr. 10) vyplývají vztahy (17). Tím jsou zavedeny nové neznámé x_a , x_b .

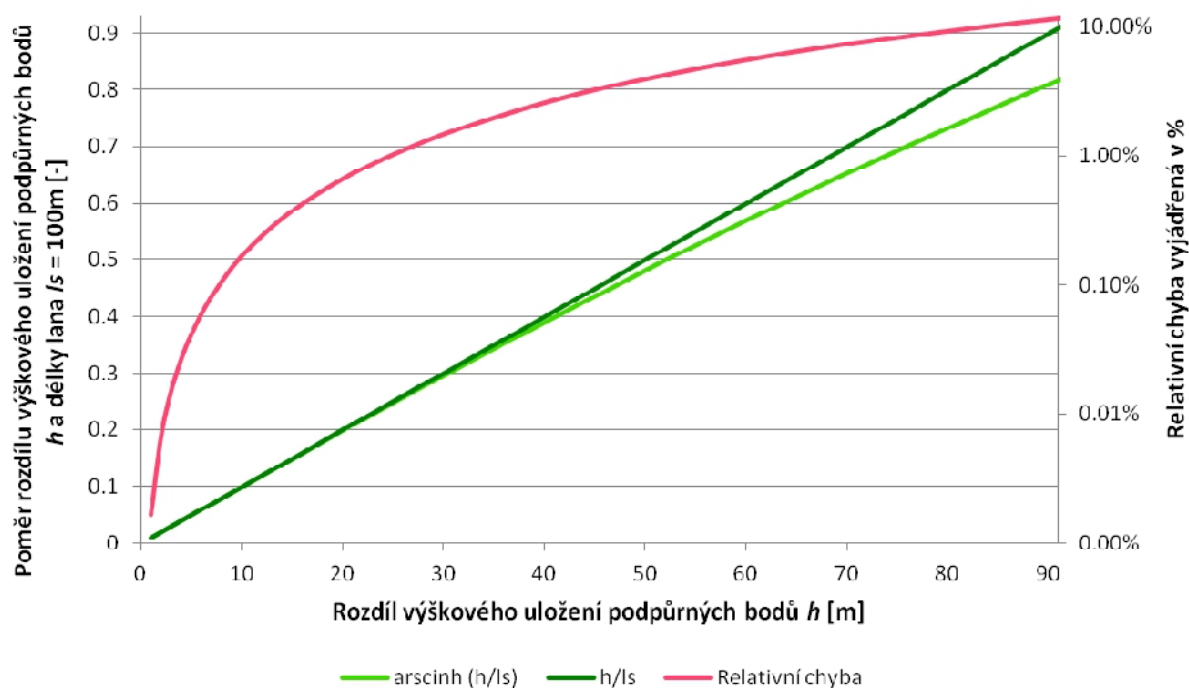
$$\begin{aligned} h &= z_b - z_a = a \cdot \cosh \frac{x_a}{a} - a \cdot \cosh \frac{x_b}{a} \\ \frac{h}{a} &= \cosh \frac{x_b}{a} - \cosh \frac{x_a}{a} \\ l &= x_a + x_b \\ \frac{h}{a} &= \cosh \frac{x_b}{a} - \cosh \frac{l - x_b}{a} \end{aligned} \quad (18)$$

Po separaci proměnných (18) lze získat výraz (19). Odtud lze vyjádřit jedinou neznámou x_b .

$$\frac{h}{l_s} = \sinh \left(\frac{x_b}{a} - \frac{l}{2 \cdot a} \right) \quad (19)$$

$$x_B = \frac{l}{2} + a \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{h}{l_s} \right) \quad (20)$$

V dalším kroku by bylo výhodné zvolit zjednodušení funkce hyperbolického arku sinu. To je možno provést buď pomocí Taylorova rozvoje, nebo úplným zanedbáním zmíněné funkce, pokud budeme její argument považovat za malý úhel. Pro účely elektrického vedení je předpoklad o počítání s malými úhly přijatelný, proto byla zvolena tato varianta.



Obr. 11 – Srovnání přesného výpočtu a výpočtu při zavedení předpokladu $\text{arcsinh}(\alpha) \approx \alpha$. Na vedlejší svislé ose je patrné znázornění relativní chyby v logaritmickém měřítku. Chyba 1% odpovídá rozdílu převýšení 25 m při délce lana 100 m.

Na obrázku (Obr. 11) je graf znázorňující vzrůstající chybu při zjednodušeném výpočtu. Jak z grafu vyplývá, pro malé úhly můžeme zavést předpoklad zjednodušení (21), aniž by došlo k výraznému ovlivnění výsledků. Chyba, která je menší než 1%, je považována za zanedbatelnou. Aby nedošlo k ovlivnění výpočtu vlivem nepřesnosti aproximace, musí být splněna podmínka: $\frac{h}{l_s} < 0,25$.

$$\text{arcsinh}\left(\frac{h}{l_s}\right) \cong \frac{h}{l_s} \quad (21)$$

$$x_b = \frac{l}{2} + a \cdot \frac{h}{l_s} \quad (22)$$

Z geometrie řetězovky (Obr. 10) vyplývá $l = x_a + x_b$

$$x_a = l - x_b = l - \left(\frac{l}{2} + \text{arcsinh}\left(\frac{h}{l_s}\right) \cdot c\right) = \frac{l}{2} - a \cdot \frac{h}{l_s} \quad (23)$$

Délku křivky lze určit jako limitu délek lomených čar.

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + z'^2} dx = \int_0^x \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{a}} dx = \int_0^x \cosh \frac{x}{a} dx$$

$$s = a \cdot \sinh \frac{x}{a} \quad (24)$$

Celkovou délku vlákna lze vyjádřit na základě již definované geometrie takto:

$$l_s = a \cdot \left(-\sinh \frac{x_a}{a} + \sinh \frac{x_b}{a} \right) \quad (25)$$

Při vyjádření reakcí se vychází ze statických podmínek rovnováhy (1) a (2). Tahová osová síla v obecném bodě $m(x, y)$ pak nabývá hodnoty:

$$N(x) = \sqrt{N_x^2 + N_z^2} = H \cdot \cosh \frac{x}{a} = a \cdot q \cdot \cosh \frac{x}{a} = q \cdot z(x) \quad (26)$$

Pro úhel φ platí:

$$\cos \varphi = \left(\cosh \frac{x}{a} \right)^{-1}; \sin \varphi = \tanh \frac{x}{a}; \tan \varphi = \sinh \frac{x}{a} \quad (27)$$

Reakce v závěsných bodech R_a, R_b :

$$R_a = a \cdot q \cdot \cosh \frac{x_a}{a}; \quad R_b = a \cdot q \cdot \cosh \frac{x_b}{a} \quad (28)$$

3.1.3 Obrácená úloha

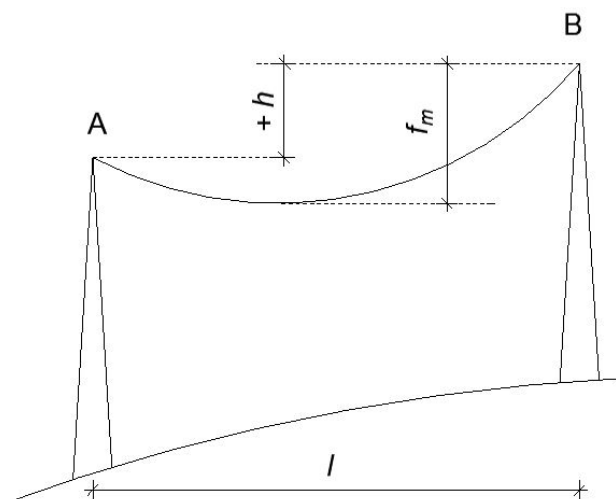
Postup popsany v kapitolách 3.1.1 a 3.1.2 slouží k návrhu vodiče vedení. Cílem této práce je zjištění sil, kterými působí vodič známého průvěsu na podpěrné body. Za okrajové podmínky lze v tomto případě považovat rozpětí pole l , průhyb vlákna f_m a rozdíl ve výšce uložení podpor h . V takovém případě je nezbytné postupovat opačným způsobem. Klíčovým krokem je vyjádření parametru řetězovky a , díky kterému lze spočítat zbývající neznámé.

Parametr a je vzdálenost nejnižšího místa řetězovky od počátku souřadného systému. Při vyjádření parametru je nutno vyjít z rovnice pro výpočet maximálního průvěsu.

Maximální průhyb f_m vyjadřuje vzdálenost od výše uloženého podpůrného bodu po nejnižší místo lana (Obr. 12). Mohou nastat tři varianty. Pro každý případ se liší výpočet maximálního průhybu vlivem geometrie. Pro přehlednost jsou varianty uvedeny matematickým zápisem, značení vychází z Obr. 10.

- 1) $z_a = z_b \Rightarrow h = 0$
- 2) $z_a < z_b \Rightarrow +h$
- 3) $z_a > z_b \Rightarrow -h$

Průhyb f_m lze vyjádřit pro každou variantu.



Obr. 12 – Hlavní parametry řetězovky, kde l značí rozpětí podpor, l_s délku lana, h rozdíl výškového uložení podpěrných bodů a f_m maximální průhyb.

Výpočet maximálního průhybu se vyjádří jako rozdíl vzdálenosti podpěrného bodu od počátku souřadného systému na ose z a parametru řetězovky a . Po dosazení lze dostat rovnici průhybu pro každou variantu.

1) Výška uložení izolátorových závěsů je stejná

$$f_m = z_b - a = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{x_b}{a}\right) - 1 \right)$$

$$x_a = x_b = \frac{l}{2}$$

$$f_m = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{l}{2 \cdot a}\right) - 1 \right) \quad (29)$$

2) Výška uložení podpěrných bodů není stejná, $z_a < z_b$

$$f_m = z_b - a = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{x_b}{a}\right) - 1 \right)$$

$$f_m = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{\frac{l}{2} + \frac{h}{l_s} \cdot a}{a}\right) - 1 \right) \quad (30)$$

3) Výška uložení podpěrných bodů není stejná, $z_a > z_b$

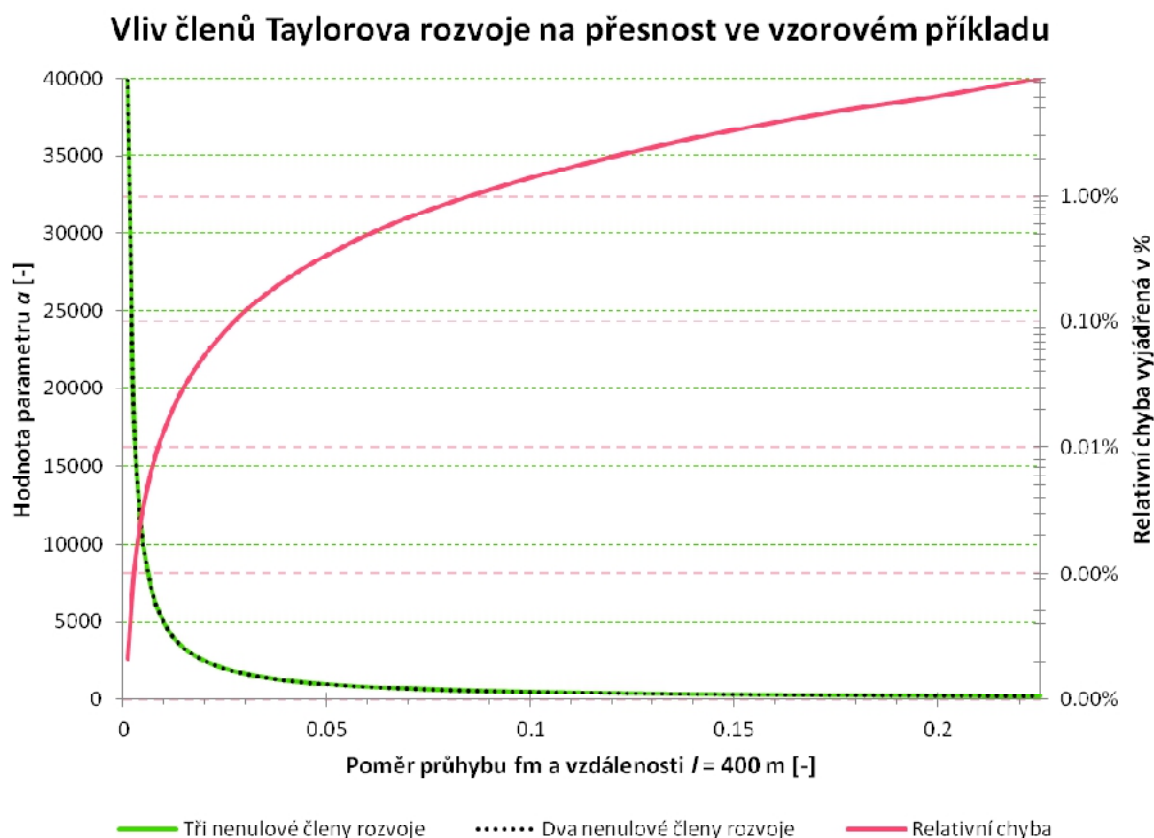
$$f_m = z_b - a = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{x_a}{a}\right) - 1 \right)$$

$$f_m = a \cdot \left(\cosh\left(\frac{\frac{l}{2} - a \cdot \frac{h}{l_s}}{a}\right) - 1 \right) \quad (31)$$

Z rovnic je potřeba vyjádřit parametr a .

Taylorův rozvoj

Z výše uvedených rovnic by bylo obtížné přímo vyjádřit parametr a , proto byl hyperbolický cosinus rozložen pomocí Taylorova polynomu. Při použití některých členů polynomu získáme pouze přibližný výsledek. Vliv členů na přesnost výsledku s přibývajícím řádem klesá [14], tudíž byla porovnávána přesnost výsledku při použití prvních dvou a tří členů řady. Ostatní členy byly zanedbány.



Obr. 13 – Vliv započítaných členů Taylorova rozvoje na přesnost ve vzorovém příkladu. Za předpokladu, že je přesnost dostatečná, pokud je relativní chyba menší než 1%, můžou být při vzdálenosti podpor $l = 400$ m použity pouze první dva nenulové členy rozvoje pro průhyb menší než 34 m.

Výpočet vychází z předpokladu, že další členy rozvoje výsledek výrazně neovlivní a největší chyba vznikne pouze při zanedbání třetího nenulového členu. Předpoklad lze uplatit, pokud relativní chyba nepřesahuje 1%. Z následující tabulky vyplývá, že relativní chyba je závislá na poměru průhybu a rozpětí (Obr. 14). Na základě tohoto zjištění lze tvrdit, že použití prvních dvou nenulových členů Taylorova rozvoje je dostatečně přesné pokud je poměr

$\frac{f_m}{l} < 0,085$. Tato podmínka je již splněna v podmínce pro plochou řetězovku (3.1).

PŘESNOST TAYLOROVA ROZVOJE PRO HYPERBOLICKÝ COSINUS					
Rozpětí	Průhyb	Poměr průhybu a rozpětí	Dva nenulové členy rozvoje	Tři nenulové členy rozvoje	Relativní chyba
l [m]	f_m [m]	$\frac{f_m}{l}$ [-]	a [-]	a [-]	[-]
100	8.5	0.085	147.05882	145.61390	0.99%
200	17.0	0.085	294.11765	291.22780	0.99%
300	25.5	0.085	441.17647	436.84171	0.99%
400	34.0	0.085	588.23529	582.45561	0.99%
500	42.5	0.085	735.29412	728.06951	0.99%

Obr. 14 – Závislost přesnosti Taylorova rozvoje na poměru průhybu a rozpětí.

Při upravení výrazů podle Taylorova rozvoje se vyšlo z předpokladu, že použití prvních dvou nenulových členů řady zajišťuje dostatečnou přesnost. Poté lze snadněji vyjádřit hledaný parametr a .

1) Výška uložení podpěrných bodů je stejná:

$$f_m = a \cdot \left(1 + \left(\frac{l}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{1}{2!} + \left(\frac{l}{2 \cdot a} \right)^4 \cdot \frac{1}{4!} \dots - 1 \right)$$

$$f_m = \frac{l^2}{8 \cdot a} \quad (32)$$

$$a = \frac{l^2}{8 \cdot f_m} \quad (33)$$

2) Výška uložení podpěrných bodů není stejná, $z_a < z_b$

$$f_m = a \cdot \left(1 + \left(\frac{\frac{l}{2} + \frac{h}{l_s} \cdot a}{a} \right)^2 \cdot \frac{1}{2!} + \left(\frac{\frac{l}{2} + \frac{h}{l_s} \cdot a}{a} \right)^4 \cdot \frac{1}{4!} \dots - 1 \right)$$

$$f_m = \frac{\left(\frac{l}{2} + a \cdot \frac{h}{l_s} \right)^2}{2 \cdot a} \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{l_s \cdot (l_s \sqrt{\frac{(f_m^2 \cdot l_s - 400 \cdot f_m \cdot h)}{l_s}} - 200 \cdot h + f_m \cdot l_s)}{h^2} \\
a_2 &= \frac{l_s \cdot (l_s \sqrt{\frac{(f_m^2 \cdot l_s - 400 \cdot f_m \cdot h)}{l_s}} + 200 \cdot h - f_m \cdot l_s)}{h^2}
\end{aligned} \tag{35}$$

3) Výška uložení podpěrných bodů není stejná, $z_a > z_b$

$$\begin{aligned}
f_m &= a \cdot \left(1 + \left(\frac{\frac{l}{2} - \frac{h}{l_s} \cdot a}{a} \right)^2 \cdot \frac{1}{2!} + \left(\frac{\frac{l}{2} - \frac{h}{l_s} \cdot a}{a} \right)^4 \cdot \frac{1}{4!} \dots - 1 \right) \\
f_m &= \frac{\left(\frac{l}{2} - a \cdot \frac{h}{l_s} \right)^2}{2 \cdot a}
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{l_s \cdot (l_s \sqrt{\frac{(f_m^2 \cdot l_s - 400 \cdot f_m \cdot h)}{l_s}} + 200 \cdot h + f_m \cdot l_s)}{h^2} \\
a_2 &= \frac{l_s \cdot (-l_s \sqrt{\frac{(f_m^2 \cdot l_s - 400 \cdot f_m \cdot h)}{l_s}} + 200 \cdot h - f_m \cdot l_s)}{h^2}
\end{aligned} \tag{37}$$

V rovnicích (33), (35) a (37) byl vyjádřen parametr a . Ovšem ze vstupních údajů není možno vyjádřit délku lana l_s . Z tohoto důvodu je nezbytné délku lana odhadnout nebo ji nahradit známým parametrem. V tomto případě je zvolena šikmá vzdálenost podpor l_n .

$$l_n = \sqrt{l^2 + h^2} \tag{38}$$

$$l_n = l_s \tag{39}$$

Po zavedení předpokladu (39) a dosazení (38) do rovnic (33), (35), (37), lze vyčíslit hodnotu parametru řetězovky a a vyjádřit všechny ostatní parametry.

3.2 Stavová rovnice

Stavová rovnice vyjadřuje vliv změny teploty na protažení vlákna a tím také na mechanické vlastnosti vodiče.

3.2.1 Odvození stavové rovnice

Oteplení vodiče způsobí nejen protažení vodiče, ale také zvětšení průřezu a zmenšení mechanického namáhání σ_H .

$$\Delta l_\vartheta = l_1 - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta = \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (40)$$

$$\Delta l_\sigma = l_0 - l_1 = \frac{l_0}{E} \cdot \Delta \sigma_H = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) \quad (41)$$

Celková změna délky vodiče:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_\vartheta - \Delta l_\sigma = \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) \\ \Delta l &= \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \end{aligned} \quad (42)$$

Délka vodiče při teplotě ϑ_1 a ϑ_0

$$l_0 = l + \frac{l^3}{24 \cdot a_0^2} ; \quad l_1 = l + \frac{l^3}{24 \cdot a_1^2} \quad (43)$$

Prodloužení vodiče se dá vyjádřit také takto:

$$\Delta l = l_1 - l_0 = l + \frac{l^3}{24 \cdot a_1^2} - l - \frac{l^3}{24 \cdot a_0^2} = \frac{l^3}{24 \cdot a_1^2} - \frac{l^3}{24 \cdot a_0^2} \quad (44)$$

Vztahy (44) a (42) se musí rovnat.

$$\frac{l^3}{24 \cdot a_1^2} - \frac{l^3}{24 \cdot a_0^2} = \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (45)$$

Zjednodušeně lze uvažovat $l_0 = l$.

$$\frac{l^2}{24 \cdot a_1^2} - \frac{l^2}{24 \cdot a_0^2} = \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (46)$$

Výraz lze upravit tak, aby vznikla kubická rovnice, ze které lze vyjádřit neznámou σ_{H1} .

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[\frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + \alpha \cdot E \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] - \frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot (a \cdot z_1)^2 = 0 \quad (47)$$

Po zavedení substituce lze získat konečný tvar stavové rovnice.

$$\begin{aligned} A &= \frac{\gamma^2 \cdot E}{24} ; B = \alpha \cdot E \\ \sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[A \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + B \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] - A \cdot (a \cdot z_1)^2 &= 0 \end{aligned} \quad (48)$$

4 Zatížení vedení

4.1 Požadavky na elektrické vedení

Venkovní vedení musí po celou dobu životnosti sloužit navrženým účelům, které lze shrnout do následujících bodů:

- Musí splňovat požadavky na spolehlivost. To znamená, že za definovaných podmínek musí sloužit ekonomicky a spolehlivě. Požadavky na spolehlivost jsou v normě [3] definovány pomocí úrovně spolehlivosti, z nichž každá odpovídá jiné teoretické době návratu klimatických zatížení (Obr. 15). Úroveň spolehlivosti 1 je uvažována jako referenční a jiné úrovně jsou při výpočtech zohledněny zavedením dílčích součinitelů γ (Obr. 16).

Úroveň spolehlivosti	Teoretická doba návratu T klimatických zatížení [roky]
1	50
2	150
3	500

Obr. 15 – Úrovně spolehlivosti [3]

Zatěžovací stav		Vítr	Námraza	Úroveň 1		Úroveň 2		Úroveň 3		Tíha
		ψ_{wc}	α	γ_w	γ_1	γ_w	γ_1	γ_w	γ_1	γ_G
1a	Zatížení větrem			1.00		1.20		1.40		1.00
1b	Minimální teplota									1.00
2a	Rovnoměrné zatížení námrazou ve všech rozpětích				1.00		1.25		1.50	1.00
2b	Rovnoměrné zatížení námrazou, příčný ohyb		α		1.00		1.25		1.50	1.00
2c	Nerovnoměrné zatížení námrazou, podélný ohyb		α_1, α_2		1.00		1.25		1.50	1.00
2d	Nerovnoměrné zatížení námrazou, kroucení		α_3, α_4		1.00		1.25		1.50	1.00
3	Kombinované zatížení větrem a námrazou	0.25		1.00	1.00	1.00	1.25	1.00	1.50	1.00

Obr. 16 – Dílčí součinitele zatížení, součinitel kombinace a redukční součinitel

- Musí splňovat požadavky na mechanické zabezpečení, což znamená, že musí odolávat řetězové reakci v případě havárie (kapitola 2.2.3).
- Musí splňovat požadavky na bezpečnost osob, aby nedošlo ke zranění nebo ohrožení života lidí při výstavbě a údržbě. Musí být bezpečné také pro veřejnost.

Dále by mělo být vedení pokud možno ekonomické, ohleduplné k životnímu prostředí, nenáročné na údržbu a trvanlivé z hlediska životnosti.

4.2 Stálá zatížení

Stálá zatížení zahrnují vlastní tíhu základů stožárů, armatur, upevněného vybavení, izolátorů a vodičů.

Stálé zatížení vodičů je vypočteno pomocí řetězovky.

$$g_k = \frac{x_{B1} + x_{A2}}{2} \cdot g_1 \quad (49)$$

$$g_D = g_k \cdot \gamma_g \quad (50)$$

Kde:

x_{B1}, x_{A2} ... Vodorovná vzdálenost mezi vrcholem řetězovky a podpěrným bodem [m]

g_1 Vlastní tíha vodiče [N/m]

γ_g Dílčí součinitel stálého zatížení [-], který je roven 1,0 pro všechny úrovně spolehlivosti (Obr. 17).

Zatížení	Ozn.	Úroveň spolehlivosti		
		1	2	3
Proměnná zatížení				
Extrémní zatížení větrem	γ_w	1.00	1.20	1.40
Jmenovité zatížení větrem	ψ_w	0.40	0.40	0.40
Extrémní zatížení námrazou	γ_I	1.00	1.25	1.50
Jmenovité zatížení námrazou	ψ_I	0.35	0.35	0.35
Stálá zatížení				
Vlastní tíha	γ_G	1.00	1.00	1.00

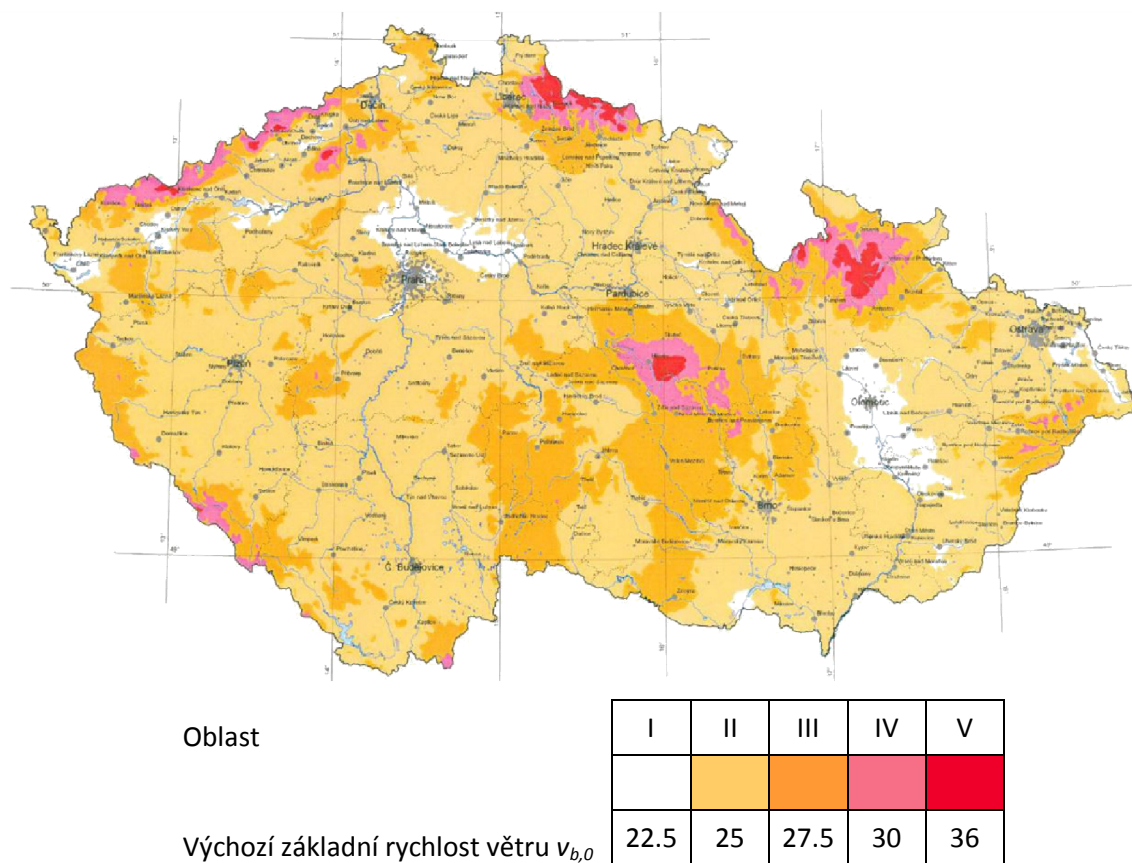
Obr. 17 – Dílčí součinitele zatížení

4.3 Proměnná zatížení

4.3.1 Zatížení větrem

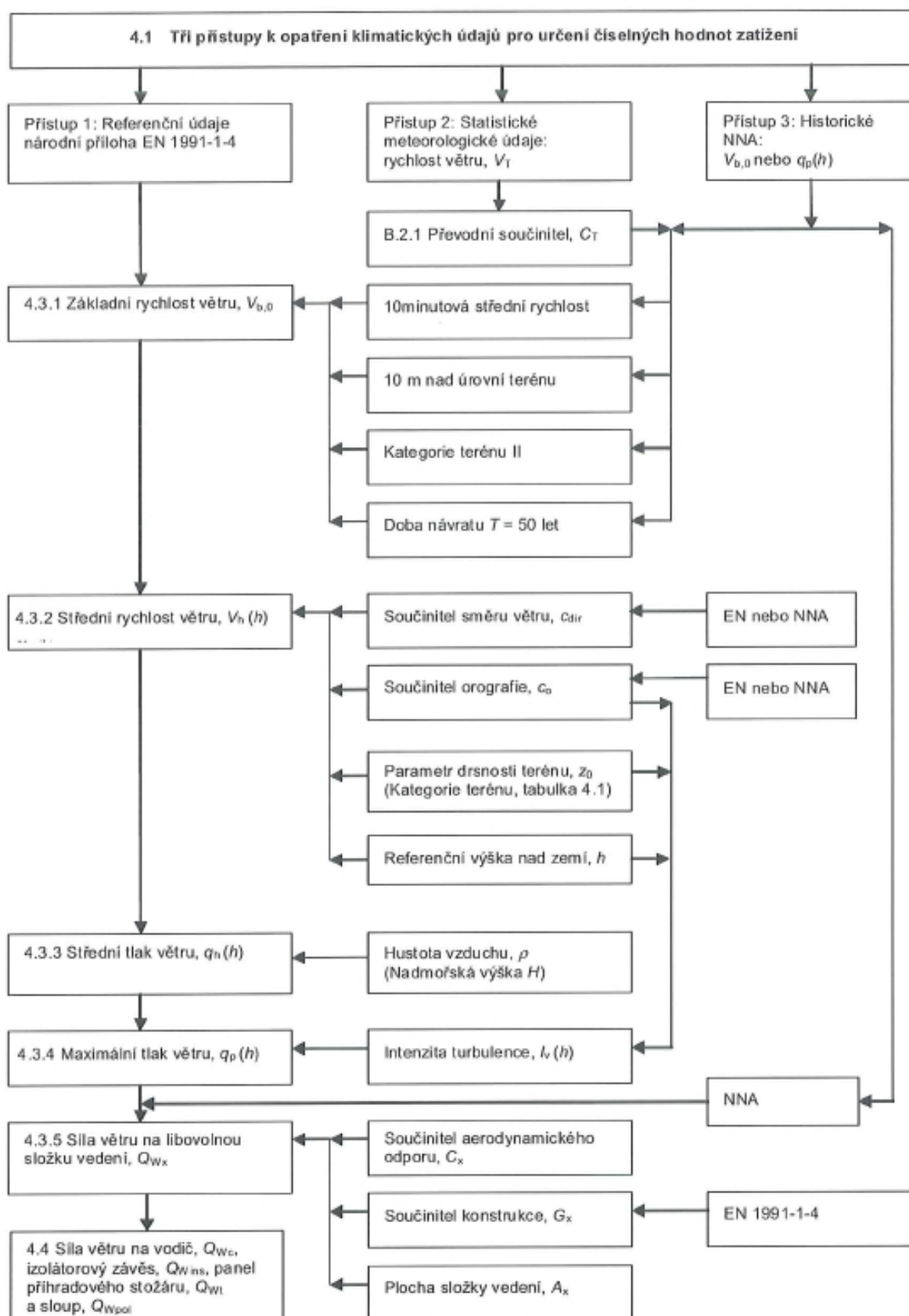
Existují tři způsoby získání klimatických údajů pro stanovení síly větru na složky vedení [3]. První přístup vychází ze základní rychlosti větru vypočtené podle normy ČSN EN 1991-1-4 [1]. Druhý přístup je založen na použití experimentálních dat převedených na referenční údaje podle normy ČSN EN 50341-1 [3]. Třetí přístup využívá empirických údajů získaných během historie navrhování venkovních vedení (Obr. 19).

Tato práce vychází z prvního přístupu a je zpracována podle normy ČSN EN 1991-1 [1]. Území České republiky je rozděleno na pět větrných oblastí. Pro každou oblast je určena jiná výchozí základní rychlost větru (Obr. 18). Ta je definována ve výšce 10 m nad terénem v kategorii terénu II. Charakteristické hodnoty odpovídají době návratu 50 let.



Obr. 18 – Větrné oblasti na území ČR [1]

Území České republiky je rozděleno na 5 oblastí podle typu terénu (Obr. 20, Obr. 21). Kategorie terénu je ve výpočtu zohledněna klesající rychlost větru nad zemí vlivem drsnosti zemského povrchu.

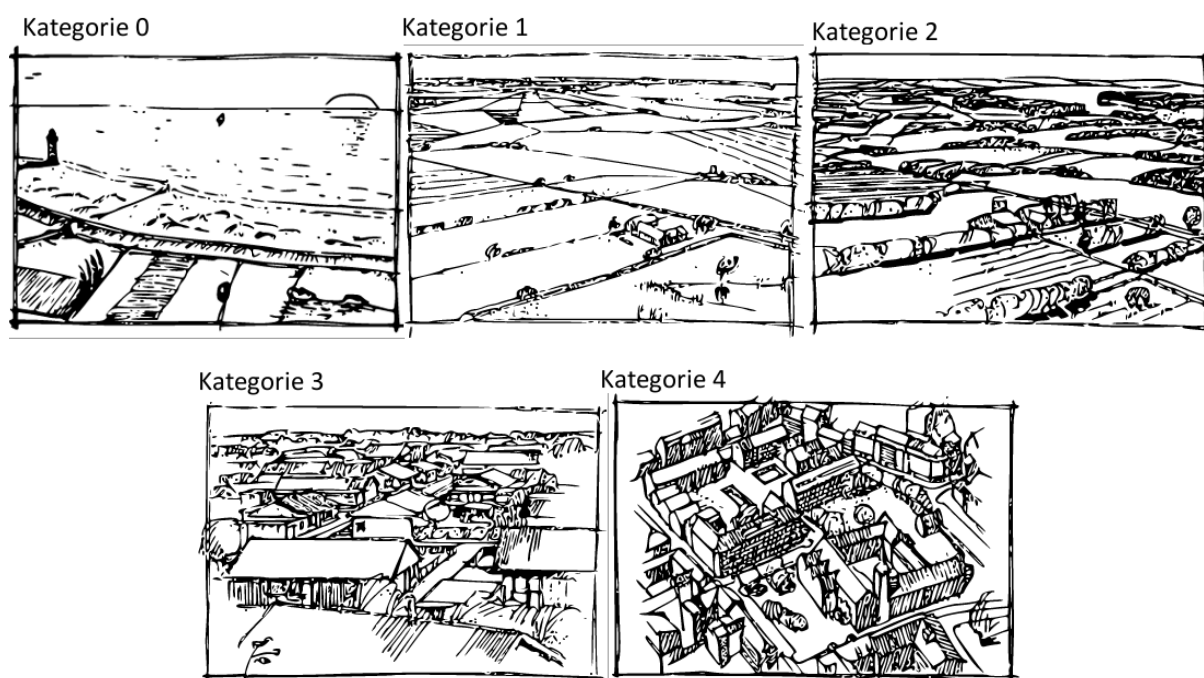


Obr. 19 – Vývojový diagram znázorňující možné postupy při výpočtu sil působících na konstrukci vlivem větru [3]

Kategorie terénu	Charakteristika terénu	k_r	z_0	z_{min}
		[-]	[m]	[m]
0	Rovná krajina bez překážek, velké vodní plochy	0.155	0.003	1
1	Jezera nebo ploché a vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací	0.169	0.01	1
2	Oblasti s nízkou vegetací (tráva) a s izolovanými překážkami (stromy, budovy). Platí $l > 20 \cdot h$	0.189	0.05	3
3	Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami a izolovanými překážkami. Platí $l < 20 \cdot h$	0.214	0.3	5
4	Oblasti, kde je min. 15% povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška > 15 m	0.233	1	10

kde: l vzdálenost překážek, h výška překážky

Obr. 20 – Kategorie terénu na území ČR



Obr. 21 – Grafické znázornění kategorií terénu [1]

Základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (51)$$

Kde:

$v_{b,0}$ Výchozí základní rychlost větru [m/s], (Obr. 18)

c_{dir} Součinitel směru větru [-]

c_{season} Součinitel ročního období [-]

Pro běžné případy se oba součinitelé uvažují 1,0 na straně bezpečné.

Střední rychlost větru

$$v_{h(h)} = c_{r(z)} \cdot c_{0(z)} \cdot v_b \quad (52)$$

Kde:

v_b Základní rychlost větru [m/s] (51)

$c_{0(z)}$ Součinitel orografie [-], který vyjadřuje vliv kopců a hor na střední rychlost větru. Doporučená hodnota je 1,0 pro většinu návrhových situací, ale pokud je vlivem orografie zvýšena rychlost větru o více než 5%, je potřeba příslušně jej upravit. [1].

$c_{r(z)}$ Součinitel drsnosti terénu [-], který zohledňuje vliv výšky nad zemí a závisí na kategorii terénu. Vypočte se podle vztahu (53). Musí být splněna podmínka $h > z_{min}$.

$$c_{r(z)} = k_r \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (53)$$

Kde:

k_r Součinitel terénu [-], který závisí na kategorii terénu (Obr. 20)

z_{min} Minimální výška pro výpočet zatížení větrem [m], (Obr. 20).

z_0 Parametr drsnosti terénu [-], (Obr. 20)

h Referenční výška [m], existuje 9 způsobů jejího určení (Obr. 22)

Referenční výška h vodiče nad zemí	Individuální výška h_i	Střední vážená výška h_w	Střední aritmetická výška h_a
Umístěná	$h = h_i$	$h = h_w = \frac{\sum_{i \geq 1} n_i \cdot d_i \cdot h_i}{\sum_{i \geq 1} n_i \cdot d_i}$	$h = h_a = \frac{\sum_{i \geq 1} n_i \cdot h_i}{\sum_{i \geq 1} n_i}$
V těžišti (1)	1	2	3
V závěsném bodu na izolátorovém závěsu	4	5	6
V závěsném bodu na izolátorovém závěsu na podpěrném bodu	7	8	9
(1) Umístěném ve spodní třetině průmětu průhybu vodiče nebo zemního lana do svislé roviny			

Obr. 22 – Určení referenční výšky

Střední tlak větru

$$q_{h(h)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (54)$$

Kde:

v_b Základní rychlost větru [m/s] (51)

ρ Hustota vzduchu [kg/m^3], která závisí na nadmořské výšce a teplotě vzduchu. Hodnotu hustoty vzduchu můžeme odečíst z tabulky (Obr. 23) v souladu s normou ČSN EN 50341-1 [3], dle národní přílohy [2] se má uvažovat $1,25 \text{ kg/m}^3$ nezávisle na teplotě vzduchu a nadmořské výšce.

Teplota T'	Nadmořská výška H			
°C	0 m	600 m	1200 m	1800 m
-30	1.18	1.10	1.02	0.95
-20	1.13	1.05	0.97	0.91
-5	1.08	1.00	0.93	0.87
5	1.04	0.96	0.90	0.84
15	1.00	0.93	0.86	0.80
30	0.96	0.89	0.83	0.77

Obr. 23 – Hodnoty hustoty vzduchu jako funkce nadmořské výšky a teploty [3]

Intenzita turbulence

$$I_{v(h)} = \frac{1}{c_0 \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (55)$$

Kde:

$c_{0(z)}$ Součinitel orografie [-], který vyjadřuje vliv kopců a hor na střední rychlost větru. Doporučená hodnota je 1,0 pro většinu návrhových situací, ale pokud je vlivem orografie zvýšena rychlost větru o více než 5%, je potřeba příslušně jej upravit [1].

z_{min} Minimální výška pro výpočet zatížení větrem [m], (Obr. 20). Musí být splněna podmínka $z_{min} > h$.

z_0 Parametr drsnosti terénu [-], (Obr. 20)

h Referenční výška [m], existuje 9 způsobů jejího určení (Obr. 22)

Maximální tlak větru

$$q_{p(h)} = q_{h(h)} \cdot (1 + 7 \cdot I_{v(h)}) \quad (56)$$

Kde:

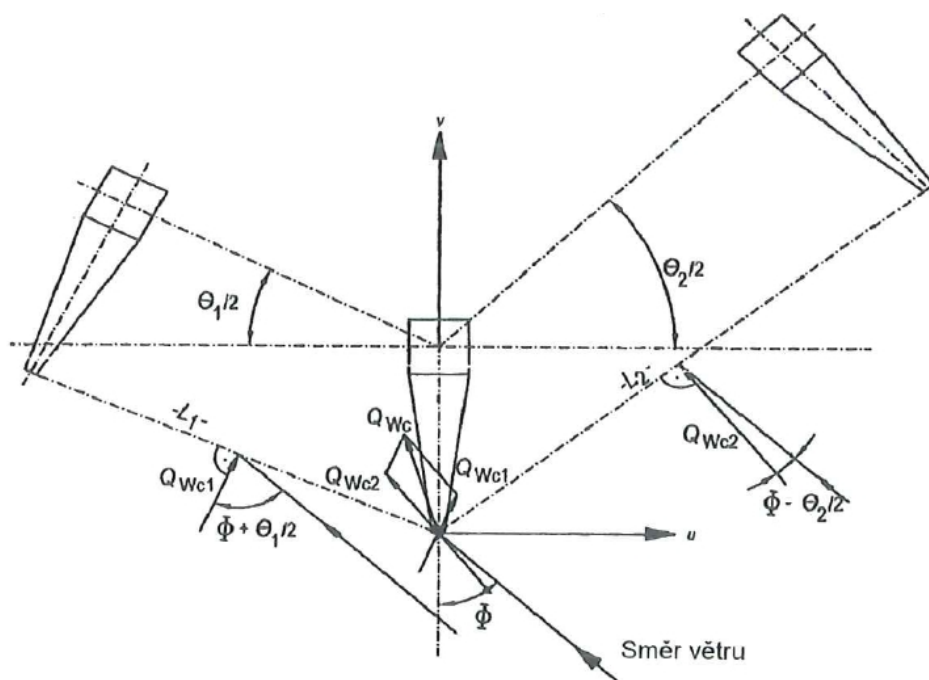
$q_{h(h)}$ Střední tlak větru [N/m^2], (54)

$I_{v(h)}$ Intenzita turbulence [-], (55)

Síly větru na složky venkovního vedení

Následně je potřeba vypočítat složky působící na složky venkovního vedení. Postup vychází z normy ČSN EN 50341-1 [3].

Tlak větru působící na vodiče v nich zvyšuje takové síly a vyvolává síly v závěsech působící kolmo ke směru vedení. Celková síla větru na svazek vodičů se určí jako součet sil působící na jednotlivá lana, efekt zastínění se zanedbává. Z tohoto důvodu je možné počítat účinky na jednotlivé lano samostatně.



Obr. 24 – Síly větru na vodiče [3]

Síly na podpěrný bod ze dvou sousedních rozpětí:

1) Ve směru konzoly

$$Q_{wc_v} = q_{p(h)} \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \left[\pm \frac{L_1}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cdot \cos \frac{\theta_1}{2} + \frac{L_2}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \cdot \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \quad (57)$$

2) Kolmo na konzolu

$$Q_{wc_u} = q_{p(h)} \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \left[\pm \frac{L_1}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta_1}{2} - \frac{L_2}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta_2}{2} \right] \quad (58)$$

Kde:

$\frac{\theta_1}{2}, \frac{\theta_2}{2}$ Úhel změny trasy (Obr. 24), [°]

ϕ Směr působení větru (Obr. 24), [°]

L_1, L_2 Délky dvou sousedních rozpětí [m]

$q_{h(h)}$ Střední tlak větru [N/m²], (54)

d Průměr vodiče [m]

G_c Součinitel rozpětí, který je dán výrazem:

$$G_c = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_{v(h)} \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_{v(h)}} \quad (59)$$

Kde:

k_p je součinitel maximální hodnoty, jeho doporučená hodnota je 3.

B^2 je součinitel odezvy pozadí a je definován [1] jako:

$$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_{(h)}}} \quad (60)$$

Kde:

L_m je střední hodnota délek sousedních rozpětí.

$$L_m = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (61)$$

$L_{(h)}$ je měřítko délky turbulence

$$L_{(h)} = 300 \cdot \left(\frac{h}{200} \right)^{0,67+0,05 \cdot \ln(z_0)} \quad (62)$$

C_c Součinitel aerodynamického odporu vodiče, který lze určit třemi způsoby.

První způsob je volit konzervativně $C_c = 1,0$; druhou možností je odvodit součinitel ze zkoušek v aerodynamickém tunelu; třetím způsobem je výpočet podle normy ČSN EN 1993-3-1 na základě Reynoldsova čísla R_e .

$$R_e \leq 6 \cdot 10^4 \quad C_c = 1,2$$

$$R_e \geq 10^5 \quad C_c = 0,9$$

Mezilehlé hodnoty lze interpolovat. Reynoldsovo číslo lze spočítat na základě kinematické viskozity vzduchu ν [m²/s] a známých parametrů takto:

$$R_e = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot q_{p(h)}}{\rho}}}{\nu} \quad (63)$$

Doporučená hodnota viskozity vzduchu je $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s

Jednotkové zatížení větrem na vodič

$$q_{wcl} = q_{p(h)} \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (64)$$

Kde:

$\frac{\theta_1}{2}$ Úhel změny trasy (Obr. 24), [°]

$q_{p(h)}$ Střední tlak větru [N/m²] (54)

d Průměr vodiče [m]

G_c Součinitel rozpětí [-] (59)

C_c Součinitel aerodynamického odporu vodiče [-]

Přetížení vodiče

Vzhledem k tomu, že předpokládáme sílu větru působící na vodič kolmo (Obr. 3), spočítá se výsledná složka působících sil pomocí Pythagorovy věty. Po vydělení vlastní tíhou vodiče získáme účinek větru a vlastní tíhy vyjádřený jako z-násobek vlastní tíhy.

$$z_1 = \frac{\sqrt{g_1 + q_{wcl}}}{g_1} \quad (65)$$

Kde:

q_{wcl} Návrhové zatížení větrem [N/m] (64)

g_1 Vlastní tíha vodiče [N/m]

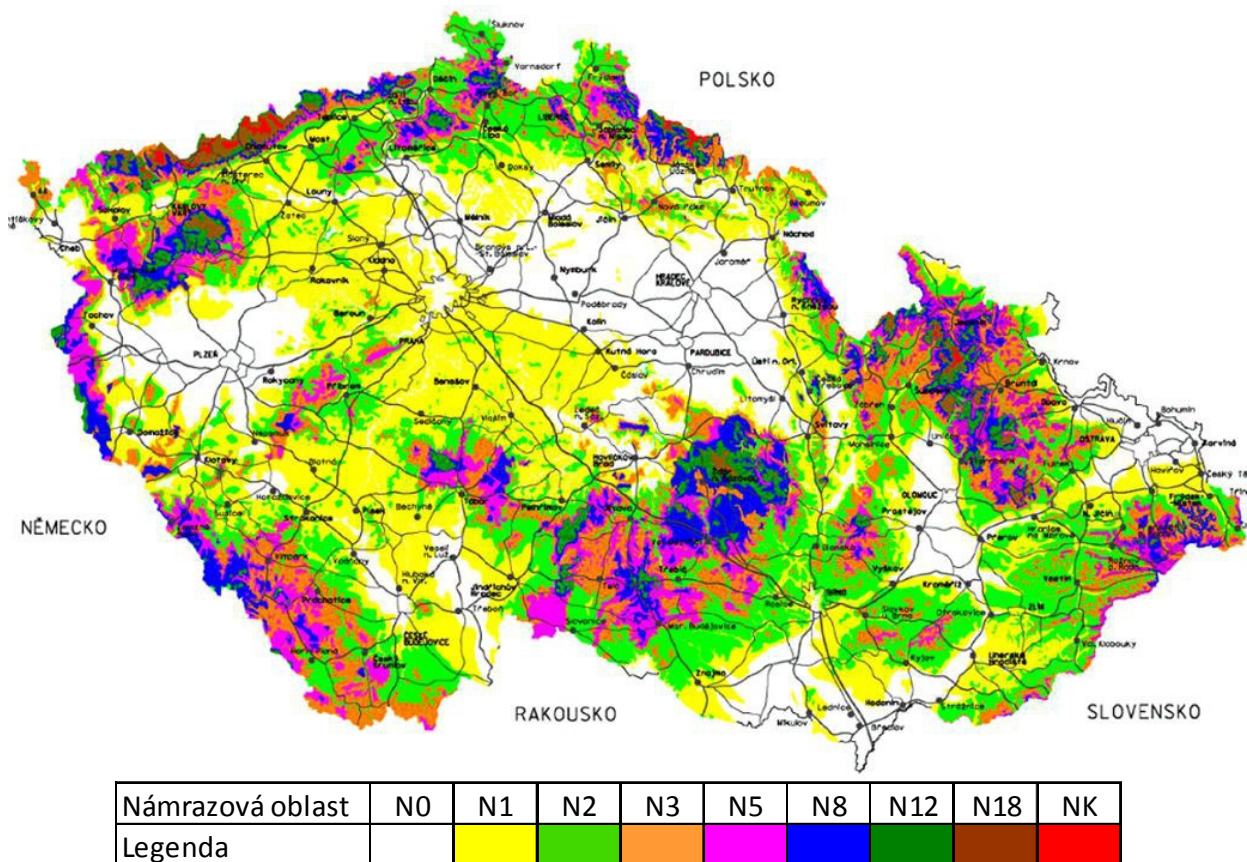
4.3.2 Zatížení námrazou

V zimě vlivem nízkých teplot a vysoké atmosférické vlhkosti dochází ke vzniku námrazy. V závislosti na průběhu tvorby se rozlišuje námraza průsvitná, zrnitá nebo krystalická. Pokud hmotnost námrazy překročí maximální zatížení, na které bylo vedení dimenzováno, může dojít přetržení vodičů nebo zlomení stožáru. Námrazu je možné odstranit buď sklepáváním izolačními tyčemi, nebo vyhříváním vodičů proudem.

Námrazová oblast	Extrémní referenční zatížení námrazou na jednotku délky vodiče I_{R50} [N/m] o průměru d [mm]		Zatížení izolátorových závěsů
	$d < 30$ mm	$d > 30$ mm	
N0	$1.298+0.1562 \cdot d$	$5.267+0.0239 \cdot d$	35
N1	$3.873+0.2698 \cdot d$	$10.566+0.0467 \cdot d$	70
N2	$10.566+0.4457 \cdot d$	$21.423+0.0838 \cdot d$	140
N3	$18.305+0.5866 \cdot d$	$33.032+0.0957 \cdot d$	210
N5	$35.376+0.8155 \cdot d$	$55.569+0.1424 \cdot d$	350
N8	$63.077+1.0890 \cdot d$	$90.254+0.1831 \cdot d$	350
N12	$102.063+1.3852 \cdot d$	143.6190	350
N18	$162.924+1.7501 \cdot d$	215.4270	350
NK	Nutno hodnotit individuálně		

Obr. 25 – Referenční zatížení námrazou

Území České Republiky je rozděleno na 9 námrazových oblastí (Obr. 26) podle nadmořské výšky a charakteru krajiny.



Obr. 26 – Mapa námrazových oblastí na území ČR

Charakteristické zatížení námrazou

$$I_k = K_h \cdot I_R \quad (66)$$

Kde:

I_R Referenční zatížení námrazou na jednotku délky vodiče [N/m] o průměru d v příslušné námrazové oblasti (Obr. 26) odečtené z tabulky (Obr. 25)

K_h Součinitel výšky pro zatížení námrazou [-], jenž je definován:

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,13} \quad \text{pro námrazové oblasti N0-N3} \quad (67)$$

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,25} \quad \text{pro námrazové oblasti N5-N18 a pro NK} \quad (68)$$

Kde: h je výška vodiče nad zemí, která se počítá s průhybem vodiče při -5°C bez námrazy.

Návrhové zatížení námrazou

$$I_D = I_k \cdot \gamma_1 \quad (69)$$

Kde:

γ_1 Dílčí součinitel zatížení [-], který závisí na požadované úrovni spolehlivosti (Obr. 17).

I_k Charakteristické zatížení námrazou [N/m] (66)

Zatížení námrazou na vodičích

Námraza vyvolává zvýšení tahu ve vodičích. Svislé zatížení námrazou působící na podpěrný bod ze dvou sousedních polí:

$$Q_I = I_D \cdot (L_{w1} + L_{w2}) \quad (70)$$

Kde:

I_D Návrhové zatížení námrazou [N/m] (69)

L_{w1}, L_{w2} Váhové délky rozpětí [m], které se určí jako vodorovná vzdálenost mezi nejnižším místem řetězovky a zkoumaným podpěrným bodem

Přetížení vodiče

Přetížení se počítá jako součet vlastní tíhy vodiče a námrazy vyjádřené na z-násobek vlastní tíhy vodiče.

$$z_1 = \frac{I_D + g_1}{g_1} \quad (71)$$

Kde:

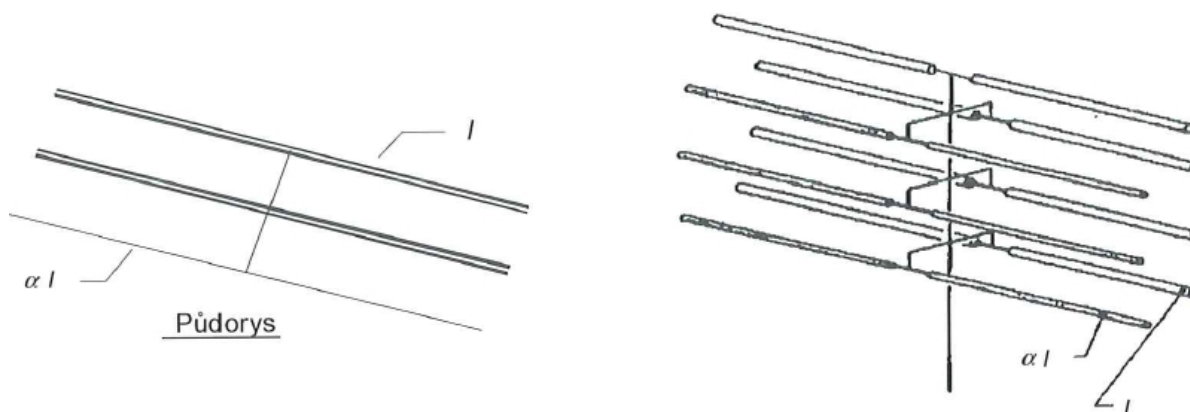
I_D Návrhové zatížení námrazou [N/m] (69)

g_1 Vlastní tíha vodiče [N/m]

4.3.3 Nerovnoměrné zatížení námrazou

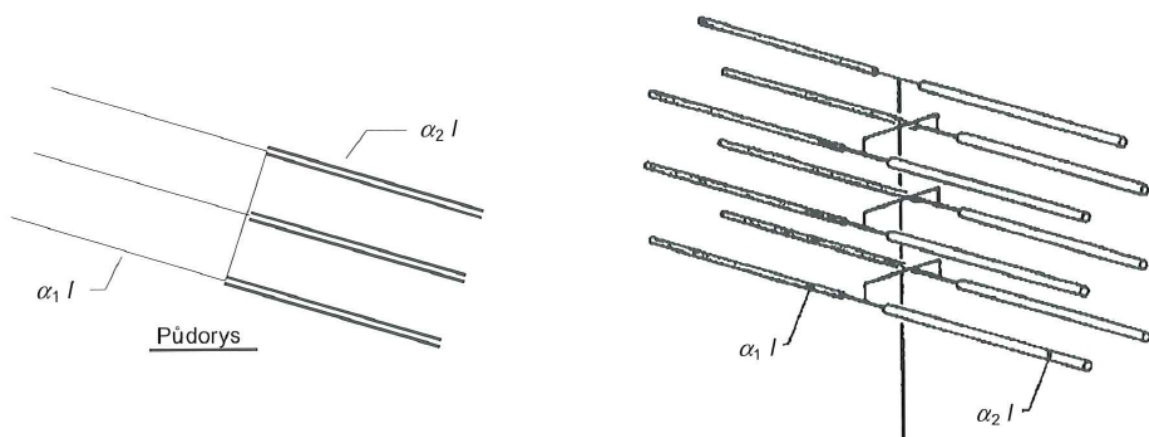
Zatížení se počítá při teplotě -5°C , bezvětří a zatížení sníženou námrazou, odpovídající charakteristické námraze. Rozlišují se tři případy nerovnoměrného zatížení námrazou [3]:

- Příčný ohyb – Na jednu polovinu konzoly působí charakteristické zatížení námrazou, na druhé straně se charakteristické zatížení má vynásobit součinitelem $\alpha = 0,5$ (Obr. 27).

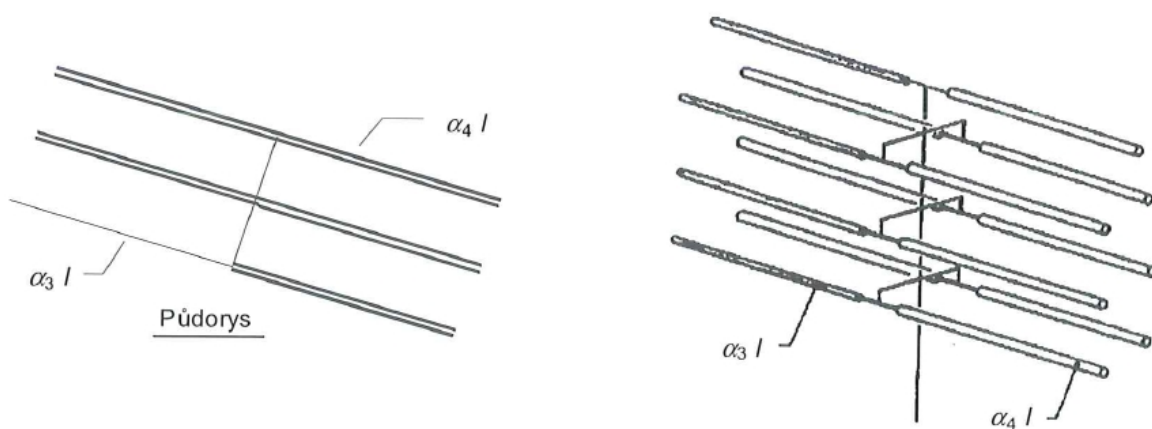


Obr. 27 – Příčný ohyb

- Podélný ohyb – Charakteristické zatížení námrazou působící na vodiče se na všech lanech v jednom poli od podpěrného bodu násobí součinitelem $\alpha_1 = 0,3$ a v druhém poli od podpěrného bodu $\alpha_2 = 0,7$ (Obr. 28).
- Kroucení – Charakteristické zatížení námrazou působící na vodič se násobí součinitelem $\alpha_3 = 0,3$ pouze na jedné straně konzoly a to jak v příčném tak v podélném směru. Ostatní zatížení působící na vodiče se násobí součinitelem $\alpha_4 = 0,7$ (Obr. 29).



Obr. 28 – Podélný ohyb



Obr. 29 - Kroucení

4.3.4 Kombinované zatížení větrem a námrazou

Účinek větru na omrzlý vodič je dán tvarem a hmotností namrzlé vrstvy a rychlostí větru působící na omrzlý vodič. V normě [3] je pro určování účinků uvedena zjednodušená metoda, která bere v úvahu dvě hlavní kombinace:

- 1) Extrémní zatížení námrazou I_T kombinované s vysoce pravděpodobnou rychlostí větru V_{IH} , která se dle národní přílohy musí uvažovat vždy.
- 2) Jmenovité zatížení námrazou I_3 kombinované s málo pravděpodobnou rychlostí větru V_{IL} , která se dle národní přílohy nemusí uvažovat [2].

Extrémní zatížení námrazou kombinované s vysoce pravděpodobnou rychlostí větru

Hustota námrazy se předpokládá $\rho_I = 500 \text{ kg/m}^3$ [2].

Dynamický tlak větru:

$$q_{hcl} = \Psi_{wc} \cdot q_{h(h)} \quad (72)$$

Kde:

Ψ_{wc} Součinitel kombinace zatížení [-], který nabývá hodnoty 0,25 (Obr. 16).

$q_{h(h)}$ Střední tlak větru [N/m²] (54)

Ekvivalentní průměr vodiče s námrazou

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 \cdot I_D}{g \cdot \pi \cdot \rho_I}} \quad (73)$$

Kde:

I_D Návrhové zatížení námrazou [N/m], (69)

d Průměr vodiče [m]

g Gravitační zrychlení [m/s²]

π Ludolfovo číslo [-]

ρ_I Hustota námrazy [kg/m³]

Síla větru na omrzlý vodič v závěsném bodu

1) Ve směru konzoly

$$Q_{wcl_v} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \left[\pm \frac{L_1}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cdot \cos \frac{\theta_1}{2} + \frac{L_2}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \cdot \cos \frac{\theta_2}{2} \right] \quad (74)$$

2) Kolmo na konzolu

$$Q_{wcl_u} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \left[\pm \frac{L_1}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta_1}{2} - \frac{L_2}{2} \cdot \cos^2 \left(\phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta_2}{2} \right] \quad (75)$$

Kde:

$\frac{\theta_1}{2}, \frac{\theta_2}{2}$ Úhel změny trasy (Obr. 24), [°]

ϕ Směr působení větru (Obr. 24), [°]

C_{cl} Součinitel aerodynamického odporu [-] pro omrzlé vodiče nabývá hodnoty 1,1 bez ohledu na průměr vodiče [2]

D Průměr omrzlého vodiče [m], (73)

q_{hcl} Dynamický tlak větru [N/m²], (72)

G_q Poryvový součinitel [-]

$$G_q = 1 + \frac{2,28}{\ln \frac{h}{z_0}} \quad (76)$$

Kde:

z_0 Parametr drsnosti terénu [-], (Obr. 20)

h Referenční výška [m], existuje 9 způsobů jejího určení (Obr. 22)

Jednotkové zatížení vodičem větrem

$$q_{wcl} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \cos^2 \left(\phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (77)$$

Přetížení vodiče

$$z_1 = \frac{\sqrt{(g_1 + I_D)^2 + q_{wcl}^2}}{g_1} \quad (78)$$

Kde:

I_D Návrhové zatížení námrazou [N/m] (69)

g_1 Vlastní tíha vodiče [N/m]

q_{wcl} Návrhové zatížení větrem [N/m] (77)

4.3.5 Účinky teploty

Změny teploty vyvolávají změny napjatosti vodiče, proto je potřeba posoudit vodiče pro všechny kritické stavy, aby v žádném stavu nedošlo k přetržení vodiče a zároveň byla dodržena minimální vzdálenost vodiče od země. Napjatost v laně (a reakce působící na konstrukci stožáru) se vypočítá pomocí stavové rovnice (3.2) na základě známého stavu.

Návrhové situace pro ověření mezních stavů

- 1) Minimální teplota bez dalších klimatických zatížení

Pro mezní stav únosnosti:

-30 °C pro úroveň spolehlivosti 1

-35 °C pro úroveň spolehlivosti 2

-40 °C pro úroveň spolehlivosti 3

Pro mezní stav použitelnosti: -30 °C bez závislosti na úrovni spolehlivosti.

- 2) Extrémní rychlost větru při předpokládané teplotě -5 °C

- 3) Minimální teplota v kombinaci se sníženou rychlostí větru - není vyžadována, pokud není uvedeno v projektové specifikaci jinak.
- 4) Extrémní zatížení námrazou při předpokládané teplotě -5 °C
- 5) Kombinované zatížení námrazou a větrem při předpokládané teplotě -5 °C

Dále musí být v každém projektu uvedeny vodorovné složky mechanického napětí vodiče při tzv. referenční teplotě, která se udává pro každý vodič při teplotě -5°C [2].

4.4 Mimořádná zatížení

Jde o soubor zabezpečovacích zatížení, které mají za cíl ochránit konstrukci proti šíření poruchy.

4.4.1 Doplnková zabezpečovací opatření

V projektové specifikaci může být vydán požadavek na mimořádná doplnková opatření (Obr. 30), například aby nejvýše každý desátý podpěrný bod byl dimenzován jako výztužný. V námrazových oblastech N5-NK nesmí být počet nosných stožárů mezi kotvenými být větší než 9 ks [2], v projektové specifikaci může být počet blíže specifikován a omezen.

Popis doplnkového zabezpečovacího opatření	Komentář
Zvýšení zbytkového statického zatížení součinitelem > 1 v jakémkoliv bodu připojení vodiče, případně zvýšení počtu uvolněných dílčích vodičů svazku	Pro vedení, kde je oprávněna vyšší úroveň zabezpečení
Zvýšení počtu bodů, ve kterých se aplikuje torzní zatížení současně	Vhodné pro vícenásobná nebo i pro dvojité vedení
Výpočet zbytkového statického zatížení pro větší výchozí tah uvažováním většího zatížení námrazou nebo zatížení určitým větrem v tomto zatěžovacím stavu	Vhodné pro rohové podpěrné body v těžších klimatických podmínkách
Vložení výztužných podpěrných bodů v určitých intervalech	Pro důležitá vedení v oblastech s těžkou námrazou

Obr. 30 – Zabezpečovací opatření

4.4.2 Laviny, sesuvy sněhu a zemětřesení

Síly působící na vedení vlivem těchto mimořádných zatížení se neuvažují, pokud není v projektové specifikaci určeno jinak.

5 Manuál pro uživatele

Program nabízí využití pro dva základní typy výpočtů:

- 1) Z hodnot naměřených v terénu (varianta A). Okrajové podmínky tvoří osové vzdálenosti stožárů, výškové uložení podpěrných bodů, parametry lan, půdorys vedení trasy a úhly odklonů. Specifickými požadavky pro tento typ úlohy je velikost maximálního průhybu a teplota vzduchu. Tato varianta je vhodná pro posouzení stávajícího vedení pomocí geodetického měření a pro ověření napjatosti lan vzhledem k projektové dokumentaci.
- 2) Hodnoty z projektové dokumentace (varianta B). Okrajové podmínky tvoří osové vzdálenosti stožárů, výškové uložení podpěrných bodů, parametry lan, půdorys vedení trasy a úhly odklonů. Specifickým požadavkem pro tuto variantu je hodnota napjatosti v laně při známém zatěžovacím stavu. Tato varianta je vhodná pro posouzení stávajících konstrukcí na základě projektové dokumentace a pro návrh nových vedení.

Program se skládá z několika listů. V závislosti na typu výpočtu a druhu vstupních údajů využije uživatel program celý nebo jeho část. Dalšími, volitelnými vstupními údaji, mohou být například střední rychlost větru, přetížení kabelu při větru a námraze apod.

Důležité informace o použití programu:

- Pole, která je potřeba vyplnit, jsou podtržena přerušovanou čarou
- Ve výpočtu se nachází několik součinitelů, které jsou nastaveny na normou doporučenou hodnotu, ale je možno je přepsat dle požadavků uživatele
- Program slouží k výpočtu jednoho lana vedení. V případě posouzení stožáru s více lany je potřeba opakovat postup n-krát pro každé lano zvlášť, popřípadě je rozdělit do skupin podle stejných charakteristik.
- Pro zachování správné funkčnosti programu je potřeba povolit používání maker
- Křížovatkové stožáry je nutno řešit jako dvě samostatné úlohy a výsledek získat superpozicí účinků sil
- Koncové stožáry lze řešit zadáním velikosti pole $L_2 = 0$

Podmínky omezující použitelnost programu:

Pro zachování maximální přesnosti výsledků je nutno splnit následující podmínky. Jejich opodstatnění je rozvedeno v kapitole 3.1.

- 1) Podmínka poměru průhybu a rozpětí

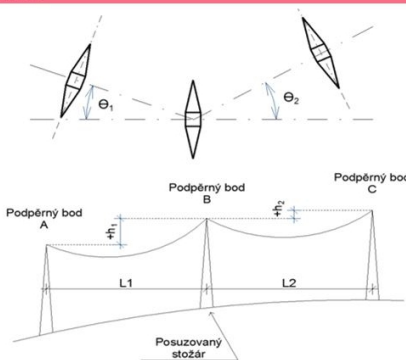
$$\frac{f_m}{l} < \frac{1}{10} \quad (79)$$

- 2) Podmínka poměru převýšení a délky lana

$$\frac{h}{l_s} < \frac{1}{4} \quad (80)$$

5.1 Zadání vstupních parametrů

První okno programu slouží k zadání známých parametrů potřebných pro výpočet a dělí se na tři části (Obr. 31). V prvním dialogovém oknu je zadán typ vodiče a další informace o použitém lanu (Obr. 32), druhá oblast shromažďuje informace o geometrii vedení (Obr. 33).

VSTUPNÍ PARAMETRY	
VODIČ	GEOMETRIE
Označení vodiče AlFe 150/6	• Půdorysné rozložení trasy Úhel změny trasy $\Theta_1 = 5^\circ$ $\Theta_2 = 10^\circ$
Jmenovitý průřez 150	
Poměr Al:Fe 6	• Rozpětí Rozpětí prvního pole L1 = 200 m Rozpětí druhého pole L2 = 200 m
Plocha S = 168.11 mm ²	
Průměr lana d = 16.96 mm	
Modul pružnosti E = 88300 MPa	
Koeficient tepelné roztažnosti $\alpha = 0.000198 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
Tíha vodiče $g_s = 4.926 \text{ N/m}$	
Tíha vodiče $\gamma = 0.0293 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{m)}$	
Napětí ve vodiči v zákl. stavu $\sigma_{10} = 93 \text{ MPa}$	
OSTATNÍ ÚDAJE	
Teplota vzduchu při měření T = 15 °C	
Úroveň spolehlivosti 1	

Z. Neuwirthová - Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožár elektrického vedení

Obr. 31 – Grafické rozhraní – Vstupní parametry

V levé horní části se nachází oblast pro zadání informací o použitém vodiči. Pro základní typy lan s ocelovým jádrem a hliníkovým elektrovodným pláštěm AlFe 6 je k dispozici databáze lan, v tomto případě se po zadání průměru další charakteristiky vyplní automaticky. Pro ostatní případy je nutné údaje zadat ručně (Obr. 32).

Napětí vodiče v základním stavu slouží u varianty A pouze jako kontrolní hodnota, které by v ideálním případě mělo být dosaženo při zatížení námrazou a -5°C. U varianty B jde o požadovaný vstupní údaj, ale je ho nutno manuálně dosadit i do listu „Stavová rovnice.“

VODIČ	
Označení vodiče	AlFe 150/6
Jmenovitý průřez	150
Poměr Al:Fe	6
Plocha	$S = \underline{\hspace{1cm}} 267.78 \text{ mm}^2$
Průměr lana	$d = \underline{\hspace{1cm}} 21.35 \text{ mm}$
Modul pružnosti	$E = \underline{\hspace{1cm}} 88300 \text{ MPa}$
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha = \underline{\hspace{1cm}} 0.00001883 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$
Tíha vodiče	$g_1' = \underline{\hspace{1cm}} 7.698 \text{ N/m}$
Tíha vodiče	$\gamma' = \underline{\hspace{1cm}} 0.0409 \text{ N/(mm}^2\cdot\text{m)}$
Napětí ve vodiči v zákl. stavu	$\sigma_{h0} = \underline{\hspace{1cm}} 90 \text{ MPa}$

Obr. 32 – Zadání charakteristik vodiče

Geometrie (Obr. 33) je definována změnami úhlů trasy, výškovým profilem trasy, u kterého je nezbytné dbát na předepsanou znaménkovou konvenci, a rozpětím polí. Je nutno rozlišovat levé a pravé pole posuzovaného stožáru. Levé pole nese značení indexů 1, pro pravé pole je volen index 2. Vzdálenosti L_1 , L_2 nejsou přímo vzdálenosti stožárů, nýbrž jde o půdorysnou vzdálenost podpěrných bodů řešeného lana.

GEOMETRIE	
<p>▪ Půdorysné rozložení trasy</p> <p>Úhel změny trasy $\theta_1 = \underline{\hspace{1cm}} 10^\circ$</p> <p>Úhel změny trasy $\theta_2 = \underline{\hspace{1cm}} 30^\circ$</p>	
<p>▪ Rozpětí</p> <p>Rozpětí prvního pole $L_1 = \underline{\hspace{1cm}} 300 \text{ m}$</p> <p>Rozpětí druhého pole $L_2 = \underline{\hspace{1cm}} 300 \text{ m}$</p>	
<p>▪ Výškový profil trasy</p> <p>Výška uložení vodiče na posuzovaném stožáru $v = \underline{\hspace{1cm}} 20 \text{ m}$</p> <p>Výškový rozdíl umístění podpěrných bodů $h_1 = \underline{\hspace{1cm}} 20 \text{ m}$ $h_2 = \underline{\hspace{1cm}} -20 \text{ m}$</p>	

Obr. 33 – Zadání geometrie vedení trasy.

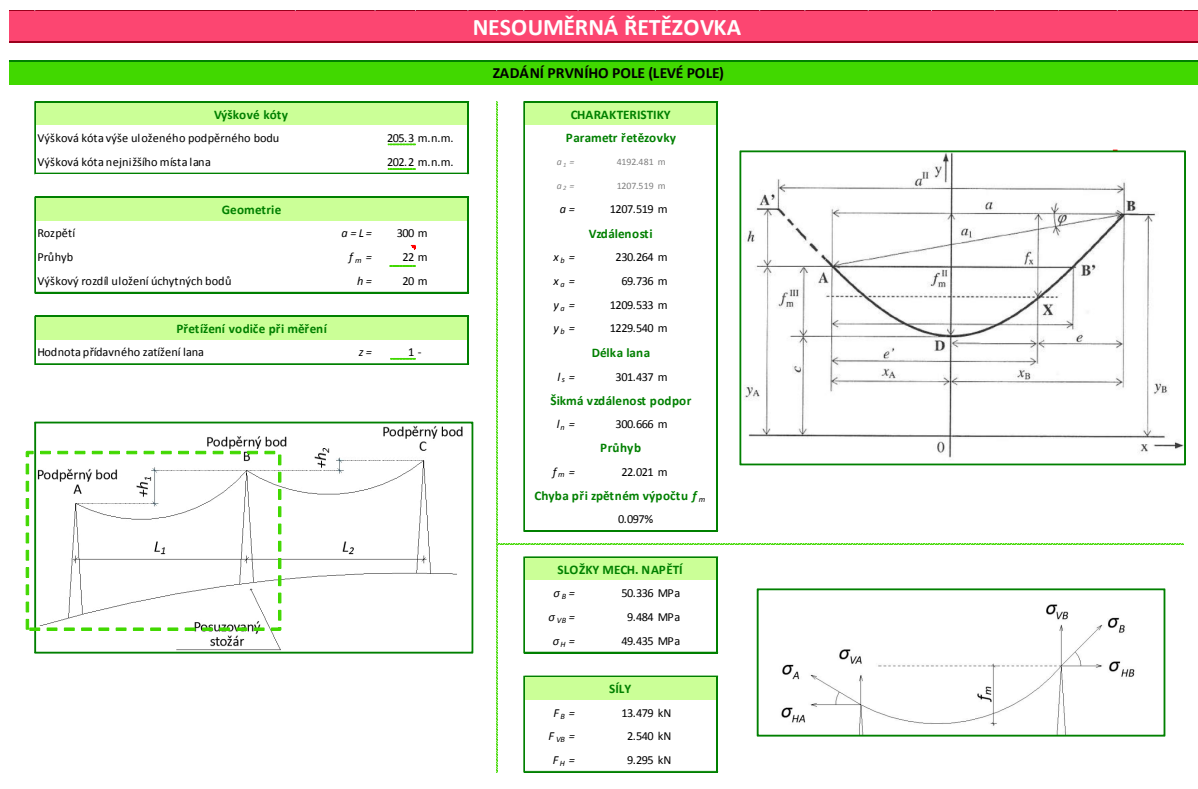
V kategorii ostatní vstupní údaje je nutno vybrat požadovanou úroveň spolehlivosti z rolovacího seznamu a teplotu prostředí při měření průhybu. Teplota vzduchu při měření je podstatný údaj pouze pro variantu A, při řešení příkladu varianty B může zůstat pole nevyplněné.

OSTATNÍ ÚDAJE	
Teplota vzduchu při měření	$T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Úroveň spolehlivosti	1

Obr. 34 – Ostatní vstupní údaje

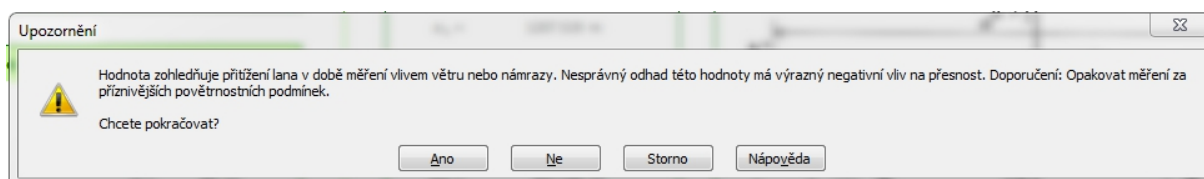
5.2 Výpočet nesouměrné řetězovky

Výpočetní postup byl popsán v kapitole 3.1.3 a 3.1.2. Okno programu sloužící k řešení řetězovky (Obr. 35) je rozděleno na tři části. První část slouží k zadání a kontrole vstupních parametrů (Obr. 37), ve druhém můžeme sledovat samotný výpočet (Obr. 38) a ze třetí části lze odečíst koncové síly a napětí v laně (Obr. 39). Samotná záložka „řetězovka“ pak obsahuje dvě obdobná, výše popsaná okna, neboť se řeší každé pole nezávisle. Konečnou hodnotu lze získat superpozicí.



Obr. 35 – Náhled na obrazovku výpočtu řetězovky.

Levá strana obrazovky (Obr. 37) slouží k zadání vstupních údajů. Rozpětí a výškový rozdíl je automaticky vyplněn na základě vstupních údajů. Průhyb je potřeba doplnit buď pomocí výškových kót získaných geodetickým měřením, nebo přímým zadáním. Doporučená hodnota přídatného zatížení lana je 1,0, což znamená, že v době měření by mělo být pokud možno bezvětří a nesmí být námraza. V případě jiných povětrnostních podmínek je nutno výpočet opatřit vhodným součinitelem přídatného zatížení. Je nezbytné brát v úvahu riziko, že nesprávně zvolený součinitel má za následek zkreslený a nepřesný výsledek. Při zadání jiné hodnoty je uživatel na tuto problematiku upozorněn (Obr. 36). V dolní polovině se nachází grafické znázornění právě řešeného pole a znaménková konvence zadávaných údajů.

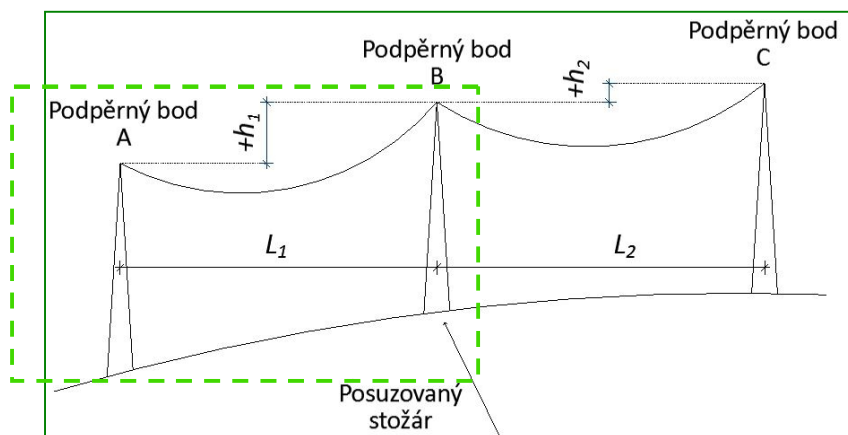


Obr. 36 – Upozornění

Výškové kóty	
Výšková kóta výše uloženého podpěrného bodu	205.3 m n.m.
Výšková kóta nejnižšího místa lana	202.2 m n.m.

Geometrie	
Rozpětí	$a = L = 300 \text{ m}$
Průhyb	$f_m = 3.1 \text{ m}$
Výškový rozdíl uložení úchytných bodů	$h = 2 \text{ m}$

Přetížení vodiče při měření	
Hodnota přídatného zatížení lana	$z = 1 -$

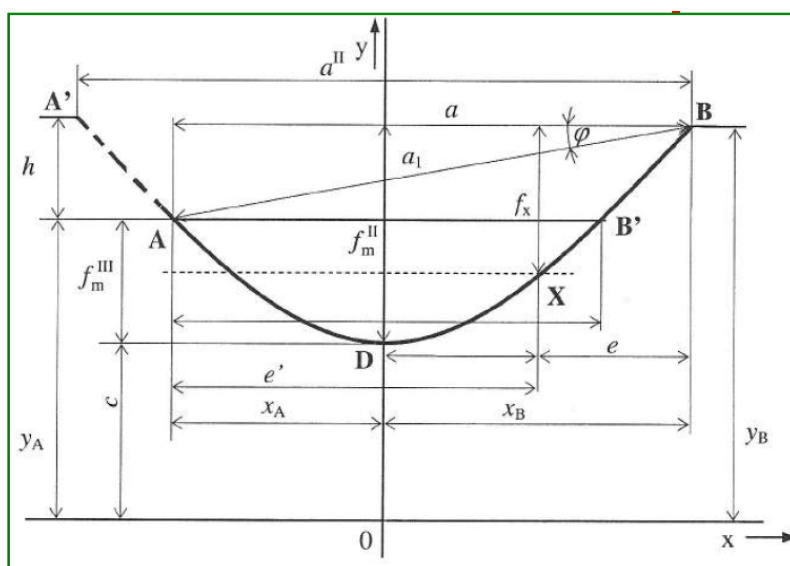


Obr. 37 – Zadání parametrů pro výpočet řetězovky.

Ve výpočtové části je na základě zadaného průhybu a rozpětí spočten parametr řetězovky a (33), (35), (37). Výsledkem řešení jsou dva kořeny a_1, a_2 . Po vypočtení vzdáleností x_a, x_b pro oba kořeny vyplývá, že pouze jeden se nachází mezi podpůrnými body. Proto byla zavedena podmínka $|x_a| + |x_b| = L$, podle které je vybrán správný kořen.

Na základě získaného parametru a jsou spočítány další parametry řetězovky. Za povšimnutí stojí, že je zpětně spočten průhyb f_m (29), (30), (31), který je porovnán se vstupní hodnotou. Tímto způsobem je sledována přesnost výpočtu (Obr. 38). Díky tomu se uživatel může sám rozhodnout, zda je pro něj odchylka přijatelná.

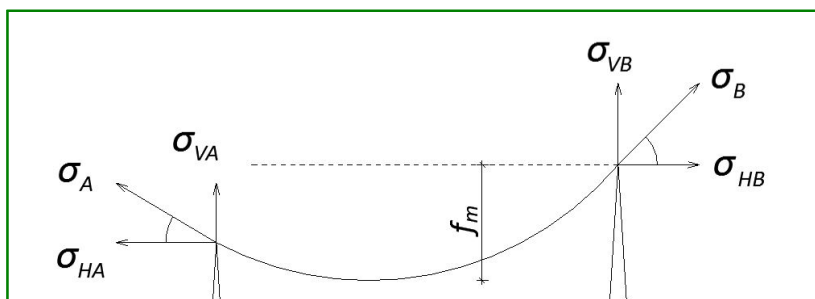
CHARAKTERISTIKY	
Parametr řetězovky	
$a_1 =$	88798.917 m
$a_2 =$	5701.083 m
$a =$	5701.083 m
Vzdálenosti	
$x_b =$	188.006 m
$x_a =$	111.994 m
$y_a =$	5702.183 m
$y_b =$	5704.183 m
Délka lana	
$l_s =$	300.041 m
Šikmá vzdálenost podpor	
$l_n =$	300.007 m
Průhyb	
$f_m =$	3.100 m
Chyba při zpětném výpočtu f_m	
	0.008%



Obr. 38 – Výpočet charakteristik řetězovky

SLOŽKY MECH. NAPĚTÍ	
$\sigma_B =$	233.523 MPa
$\sigma_{VB} =$	7.698 MPa
$\sigma_H =$	233.396 MPa

SÍLY	
$F_B =$	62.532 kN
$F_{VB} =$	2.061 kN
$F_H =$	43.887 kN



Obr. 39 – Koncové síly a napětí získané výpočtem. Nalevo vidíme hodnoty působících sil na podpěrný bod a koncová napětí kabelu. Vypsány jsou jen síly působící na posuzovaný stožár. Napravo je pak grafické znázornění působících sil.

5.3 Výpočet zatížení větrem

Postup výpočtu zatížení větrem je popsán v kapitole 4.3.1. List sloužící pro výpočet zatížení větrem se skládá z několika částí. V prvním sloupci se nachází mapa větrných oblastí ČR, pod kterou je potřeba vybrat z rolovacího seznamu větrnou oblast odečtenou z mapy, a kategorii terénu (Obr. 41).

V horní části druhého sloupce je potřeba zadat referenční výšku (Obr. 40). Existuje 9 způsobů, jak definovat referenční výšku (Obr. 22), [3]. Předdefinována je jako výška izolátorového závěsu. Pokud si uživatel přeje použít jiný způsob výpočtu, je nezbytné vzdálenost vyplnit manuálně. Hustota vzduchu je nastavená na normou doporučenou hodnotu [2].

VSTUPNÍ ÚDAJE		
Referenční výška	$h =$	20 m
Výška nad zemí	$z =$	20 m
Hustota vzduchu	$\rho =$	1.25 kg/m ³

Větrná oblast	II	
Kategorie terénu	2	

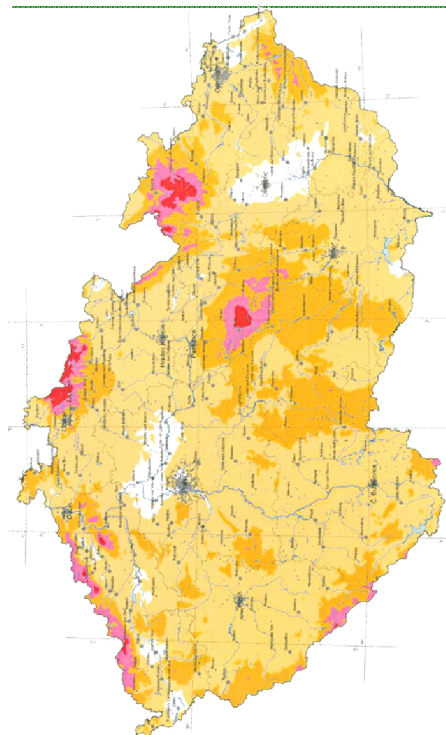
HODNOTY ZÁVISEJÍCÍ NA UMÍSTĚNÍ STAVBY		
Základní rychlost větru	$v_{b,0} =$	25 m/s
Součinitel terénu	$k_r =$	0.189
Parametr drsnosti terénu	$z_0 =$	0.05 m
Minimální výška	$z_{min} =$	3

SOUČiniteLE		
Součinitel orografie	$c_0(z) =$	1
Součinitel směru větru	$c_{dir} =$	1

VÝPOČET		
Střední rychlost větru	$v_h(h) =$	28.31 m/s
Střední tlak větru	$q_h(h) =$	500.90 N/m ²
Intenzita turbulence	$I_v(h) =$	0.1669 -
Maximální tlak větru	$q_p(h) =$	1086.11 N/m ²

Obr. 40 – Výpočet zatížení větru dle normy ČSN EN 1991-1-4 [1].

MAPA VĚTRNÝCH OBLASTÍ NA ÚZEMÍ ČR



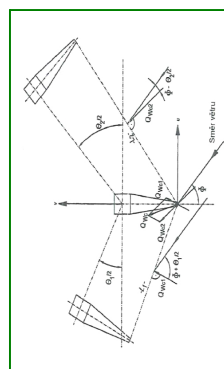
Oblast	I	II	III	IV	V
Východní základní rychlost větru $v_{d,0}$	22,5	25	27,5	30	36

Zvolte větrnou oblast podle mapy ČR:

Zvolte kategorií terénu:

Kategorie terénu	k_t	z_0	z_{min}
0 Rovná krajina bez překážek, velké vodní plochy	0,155	0,008	1
1 Jezera nebo ploché a vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací	0,169	0,01	1
2 Oblasti s nízkou vegetací (tráva) a s izolovanými překážkami (stromy, budovy). Platí / > 20h	0,189	0,05	3
3 Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami a izolovanými překážkami. Platí / < 20 h	0,214	0,3	5
4 Oblasti, kde je min. 15% povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška > 15m	0,233	1	10

kde: z vzdálenost překážek, h výška překážky



ZATÍŽENÍ VĚTREM

VSTUPNÍ ÚDAJE	
Referenční výška	$h = 20 \text{ m}$
Výška nad zemí	$z = 20 \text{ m}$
Hustota vzduchu	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

VĚTRNÁ OBLAST	
Kategorie terénu	II
	3

HODNOTY ZÁVISEJÍCÍ NA UMÍSTĚNÍ STAVBY	
Základní rychlost větru	$v_{d,0} = 25 \text{ m/s}$
Součinitel terénu	$k_t = 0,214$
Parametr drsnosti terénu	$z_0 = 0,3 \text{ m}$
Minimální výška	$z_{min} = 5$

SOUČINITELE	
Součinitel orografie	$c_d(z) = 1$
Součinitel směru větru	$c_{dir} = 1$

VÝPOČET	
Střední rychlost větru	$v_k(h) = 22,47 \text{ m/s}$
Střední tlak větru	$q_k(h) = 315,52 \text{ N/m}^2$
Intenzita turbulence	$I_z(h) = 0,2381$
Maximální tlak větru	$q_d(h) = 841,42 \text{ N/m}^2$

SÍLY VĚTRU NA VODIČE

VSTUPNÍ ÚDAJE	
Referenční výška	$h = 20 \text{ m}$
Úhel změny trasy	$\theta_1 = 0,1745 \text{ rad}$
Úhel změny trasy	$\theta_2 = 0,5236 \text{ rad}$
Rozpětí	$L_1 = 300 \text{ m}$
Rozpětí	$L_2 = 300 \text{ m}$
Průměrné rozpětí	$L_m = 300 \text{ m}$
Průměr labele	$d = 0,02135 \text{ m}$

SOUČINITELE	
Součinitel maximální hodnoty	$k_p = 3$
Součinitel odevzu pozadí	$B^2 = 0,1407$
Součinitel rezonanční části odezvy	$R^{2*} = 0$
Součinitel konstrukce	$G_c = 0,5759$
Součinitel aerodynamického odporu	$C_s = 0,9$

POMOCNÉ VÝPOČTY

Měřitko délky turbulence	$L(h) = 73,67 \text{ m}$
Reynoldsovo číslo	$Re = 2,4E+06$
Kinematická viskozita vzduchu	$\nu = 0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$

SÍLY VĚTRU NA VODIČ PRO RŮZNÉ ÚHLÝ						
Úhel	$q_{w,vl}$	$q_{w,ul}$	$q_{w,c}$	$q_{w,c,1}$	$q_{w,c,2}$	$q_{w,c}$
Stupně	Radially	kN	kN	N/m	N/m	N/m
0°	0,000	2,241	0,759	2,366	9,031	6,984
10°	0,175	2,283	0,831	2,429	8,222	5,464
20°	0,349	2,205	0,859	2,366	6,984	3,847
30°	0,524	2,017	0,841	2,185	5,464	2,328
40°	0,698	1,741	0,778	1,907	3,847	1,089
50°	0,873	1,412	0,677	1,566	2,328	0,281
60°	1,047	1,068	0,552	1,202	1,089	0,000
70°	1,222	0,751	0,417	0,859	0,281	0,397
80°	1,396	0,500	0,289	0,577	0,000	1,089
90°	1,571	0,344	0,182	0,389	0,281	2,328
100°	1,745	0,302	0,110	0,322	1,089	3,847
110°	1,920	0,380	0,082	0,389	2,328	5,464
120°	2,094	0,568	0,100	0,577	3,847	6,984
130°	2,269	0,844	0,163	0,859	5,464	8,222
140°	2,443	1,173	0,264	1,202	6,984	9,031
150°	2,618	1,517	0,389	1,566	8,222	9,312
160°	2,793	1,834	0,524	1,907	9,031	9,031
170°	2,967	2,085	0,652	2,185	9,312	8,222
180°	3,142	2,241	0,759	2,366	9,031	6,984

MAX. SÍLA VĚTRU NA PODPĚRNÝ BOD

Ve směru konzoly	$Q_{w,c,zmax} = 2,288$	$Q_{w,c,d} = 2,205$	$Q_{w,c,d} = 2,241$
Kolmo na konzolu	$Q_{w,c,d} = 0,831$	$Q_{w,c,ulmax} = 0,859$	$Q_{w,c,ul} = 0,759$
Úhel působení větru	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 0^\circ$

PŘÍTIŽENÍ VODIČEM

Úhel větru	$\phi = 170$	$\phi = 150$	$\phi = 160$
Rovnom. zat. na 1.lano	$q_{w,c,zmax} = 9,312$	$q_{w,c,1} = 8,222$	$q_{w,c,1} = 9,031$
Rovnom. zat. na 2.lano	$q_{w,c,2} = 8,222$	$q_{w,c,zmax} = 9,312$	$q_{w,c,2} = 9,031$
Hodnota přítlžení	$z_1 = 1,569$	$z_1 = 1,463$	$z_1 = 1,542$
Vodíče vlivem větru	$z_2 = 1,463$	$z_2 = 1,569$	$z_2 = 1,542$

Obr. 41 – List výpočtu zatížení větrem

Ve spodní části druhého sloupce se nachází seznam součinitelů potřebných pro výpočet a pomocné výpočty (Obr. 42). Vstupní údaje jsou automaticky doplněny, úhly jsou převedeny na radiány. Podle doporučení normy [3] je součinitel maximální hodnoty roven 3, rezonanční část odporu je zanedbána a součinitel aerodynamického odporu je volen na základě výpočtu Reynoldsova čísla.

SÍLY VĚTRU NA VODIČE

VSTUPNÍ ÚDAJE		
Referenční výška	$h =$	20 m
Úhel změny trasy	$\vartheta_1 =$	0.1745 rad
Úhel změny trasy	$\vartheta_2 =$	0.5236 rad
Rozpětí	$L_1 =$	300 m
Rozpětí	$L_2 =$	300 m
Průměrné rozpětí	$L_m =$	300 m
Průměr kabelu	$d =$	0.02135 m

SOUČiniteLE		
Součinitel maximální hodnoty	$k_p =$	3
Součinitel odezvy pozadí	$B^2 =$	0.1675
Součinitel rezonanční části odezvy	$R^2 =$	0
Součinitel konstrukce	$G_c =$	0.6502
Součinitel aerodynamického odporu	$C_c =$	0.9

POMOCNÉ VÝPOČTY		
Měřítka délky turbulence	$L(h) =$	90.55 m
Reynoldsovo číslo	$Re =$	2.8E+06
Kinematická viskozita vzduchu	$\nu =$	0.000015 m ² /s

Obr. 42 – Výpočet zatížení větru dle [1]

Ve třetím sloupci se nachází výpočet sil větru působících na vodič pod různými úhly (Obr. 43). V tabulce lze najít síly působící svisle na podpěrný bod rozložený do směru kolmého a vodorovného s konzolou. Na základě této tabulky jsou vybrány dva úhly, které zapříčiňují nejnepríznivější účinky větru (Obr. 44). Vypsány jsou také hodnoty pro směr větru rovnoběžný s konzolou.

Pro všechny úhly jsou spočítány hodnoty přetížení vodiče rovnoměrným zatížením. Zatížení je rozloženo a v tabulce jsou vypsány účinky působící v kolmém směru na každý vodič. V posledním sloupci se nachází výsledná hodnota rovnoměrného zatížení působící pod

úhlem směru větru θ . Pro další výpočty je vybrán maximální účinek působící na první vodič, maximální síla na druhý vodič a maximální hodnota výslednice a jim odpovídající síly působící na vedlejší pole pro stejný směr větru. Pro přímé vedení trati budou hodnoty pro všechny tři případy totožné.

V případě, že vítr působí pod obecným úhlem θ , nevytváří rovnoměrné zatížení na oba vodiče. To znamená, že přetížení je pro každé z těchto dvou lan různé, ale tvoří dvojici, která musí být použita v jednom zatěžovacím stavu.

SÍLY VĚTRU NA VODIČ PRO RŮZNÉ ÚHLY							
Úhel		Q_{wc_v1}	Q_{wc_u1}	Q_{wc}	q_{wc_1}	q_{wc_2}	q_{wc}
Stupně	Radiány	kN	kN	kN	N/m	N/m	N/m
0°	0.000	3.266	1.106	3.448	13.161	10.177	16.637
10°	0.175	3.327	1.211	3.540	11.982	7.963	14.387
20°	0.349	3.213	1.252	3.448	10.177	5.607	11.619
30°	0.524	2.939	1.225	3.184	7.963	3.392	8.656

Obr. 43 – Síly větru na vodič (část tabulky)

MAX. SÍLA VĚTRU NA PODPĚRNÝ BOD					
Ve směru konzoly	$Q_{wc_v1max} =$	3.327	$Q_{wc_v1} =$	3.213	$Q_{wc_v1} =$ 3.266
Kolmo na konzolu	$Q_{wc_u1} =$	1.211	$Q_{wc_u1max} =$	1.252	$Q_{wc_u1} =$ 1.106
Úhel působení větru	$\phi =$	10°	$\phi =$	20°	$\phi =$ 0°

PŘÍTÍŽENÍ VODIČEM						
Úhel větru	$\phi =$	170°	$\phi =$	150°	$\phi =$	160°
Rovnom. zat. na 1. lano	$q_{wc_1max}=$	13.570	$q_{wc_1}=$	11.982	$q_{wc_1}=$	13.161
Rovnom. zat. na 2. lano	$q_{wc_2}=$	11.982	$q_{wc_2max}=$	13.570	$q_{wc_2}=$	13.161
Hodnota přitížení vodiče	$z_1 =$	2.027	$z_1 =$	1.850	$z_1 =$	1.981
vlivem větru	$z_2 =$	1.850	$z_2 =$	2.027	$z_2 =$	1.981

Obr. 44 – Výstupy z listu zatížení větrem.

Výpočetní program slouží k posouzení stávajícího vedení. To však mohlo být navrženo v době platnosti jiných norem. Proto je v programu nabídnut výpočet přetížení kabelu i podle normy ČSN 33 3300 [4].

Ve výpočtu zatížení větrem podle normy ČSN 33 3300 [4] je rychlost větru odvozená na základě výšky uložení podpěrného bodu. Oproti aktuálně platné legislativě není Česká

republika členěná na oblasti ani se neurčuje kategorie terénu a celý výpočet je stručnější a méně podrobný.

Na listu pro výpočet zatížení větrem (Obr. 45) se nachází také výpočet pro kombinaci větru a námrazy. Nejprve je potřeba zadat výšku stožáru a rozpětí, výsledkem je přetížení vodiče z na omrzlý i neomrzlý vodič.

ZATÍŽENÍ VĚTREM

Na vodiče podle ČSN 33 3300 (platné 05/1984 - 11/2002)

Výška závěs. bodu [m]	Rychlost větru [m/s]	Součinitel α (pro $a < 20$)	Součinitel α (pro $a > 20$)
0-20	29.6	1	0.8
20-40	33.5	1	0.75
40-100	38	1	0.75
100-150	43	1	0.75

Aerodyn. souč. c_v	Tvar vodiče
1	omrzlý vodič
1	$d < 16$ mm
1.1	$d > 16$ mm

VSTUPNÍ ÚDAJE

Průměr vodiče	$d =$ 21.35 mm
Výška stožáru	$y_A =$ 22 m
Rozpětí	$a =$ 300 m
Součinitel nerovnoměrnosti tlaku větru na vodiči	$\alpha_v =$ 0.75 -

NEOMRZLÝ VODIČ

Aerodynam. součinitel v záv. na tvaru vodiče	$c_v =$ 1.1 -
Rychlost větru	$v =$ 33.5 m/s
Přídavné zatížení větrem pro neomrzlý vodič	$g_{zv} =$ 12.35 N/m
Celkové přetížení větrem	$z =$ 1.89 -

OMRZLÝ VODIČ

Aerodynam. součinitel v záv. na tvaru vodiče	$c_v =$ 1 -
Rychlost větru	$v =$ 16.75 m/s
Tloušťka námrazku	$t =$ 16.95 mm
Přídavné zatížení větrem pro omrzlý vodič	$g_{zv} =$ 7.27 N/m
Celkové přetížení větrem	$z =$ 2.25 -

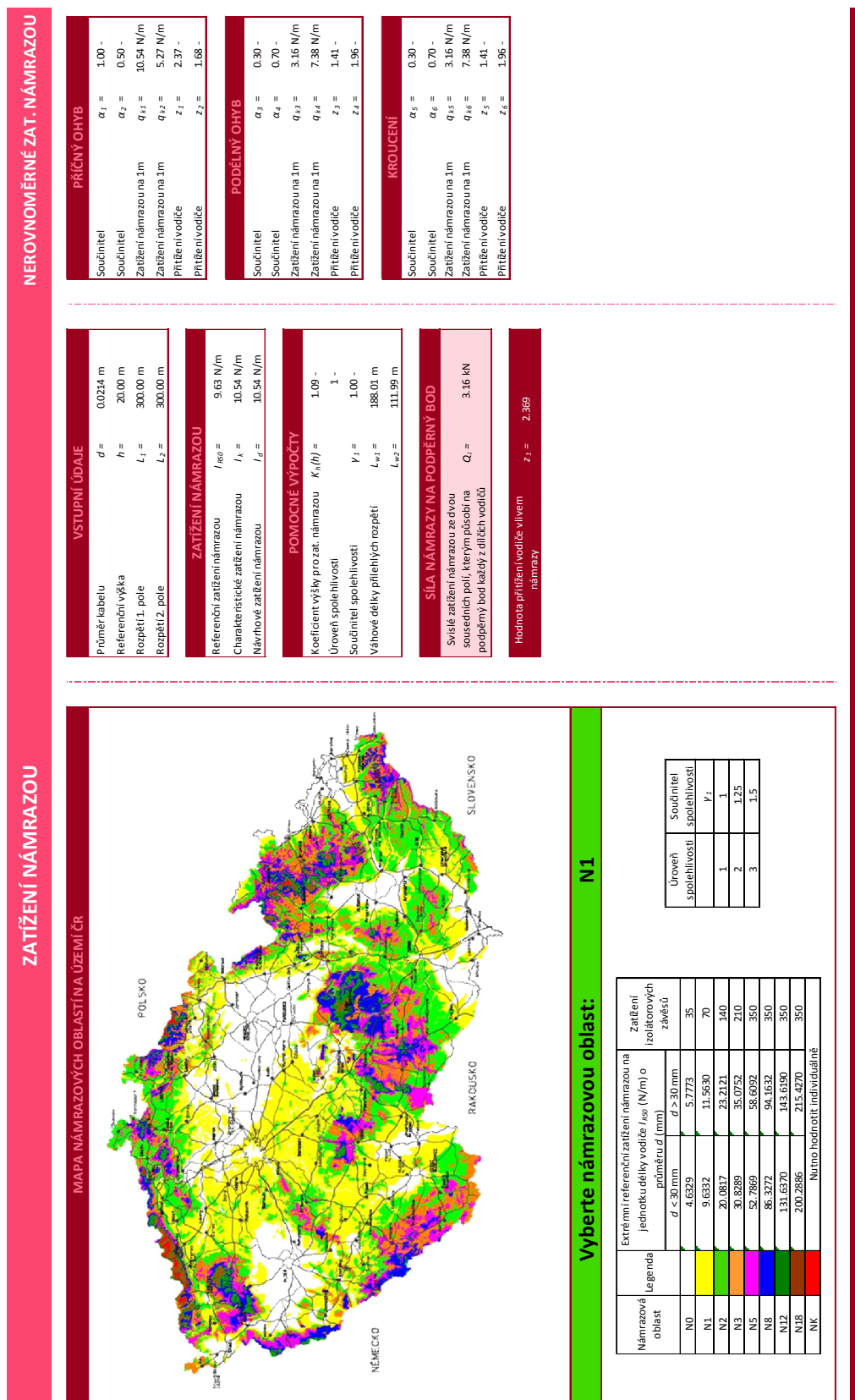
Z. Neuwirthová - Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožáry elektrického vedení

Obr. 45 – Zatížení větrem dle ČSN 33 3300

Pozn.: Pro správné použití výsledků je potřeba hodnoty přetížení manuálně přepsat do listu stavové rovnice (kapitola 6.2).

5.4 Výpočet zatížení námrazou

Postup výpočtu zatížení námrazou je popsán v kapitole 4.3.2.



Obr. 46 – List výpočtu zatížení námrazou

Okno pro výpočet (Obr. 46) je rozděleno na dvě části. V levé části je potřeba zvolit z rolovacího seznamu námrazovou oblast podle přiložené mapy námrazových oblastí. Jiné parametry není potřeba zadávat, referenční výška je převzatá z výpočtu zatížení větrem. Tabulka v levé dolní části počítá referenční zatížení námrazou při daném průměru vodiče pro všechny námrazové oblasti. Do výpočtu je pak vybrána správná hodnota. V pravé části proběhne výpočet podle výše uvedeného postupu a v dolní oblasti lze odečíst výsledky. Pole s výslednými hodnotami jsou barevně vyznačeny.

V rámci diplomové práce byla také vytvořena pomůcka pro výpočet zatížení námrazou podle již neplatné normy ČSN 33 3300 [4], (Obr. 47).

Postup použití této pomůcky je následující. Nejprve je potřeba vyplnit údaje o vodiči a následně odečíst námrazovou oblast z přiložené mapy a pomocí rozevíracího seznamu v pravé části ji zadat do výpočtu (Obr. 47). Podle normy [4] je Česká republika členěna na 4 námrazové oblasti – lehká (L), střední (S), těžká (T) a kritická (K). Následně je v několika krocích spočítána hodnota přetížení vodiče normální námrazou a zvýšeným námrazkem. Postup výpočtu je uveden na příkladu v příloze C. Výsledné hodnoty přetížení vodiče slouží jako vstupní údaje pro výpočet stavové rovnice.

Pozn.: Hodnoty přetížení vodiče je potřeba manuálně dosadit do stavové rovnice. Automaticky jsou doplněny pouze hodnoty podle platné normy ČSN EN 50 341 [3].

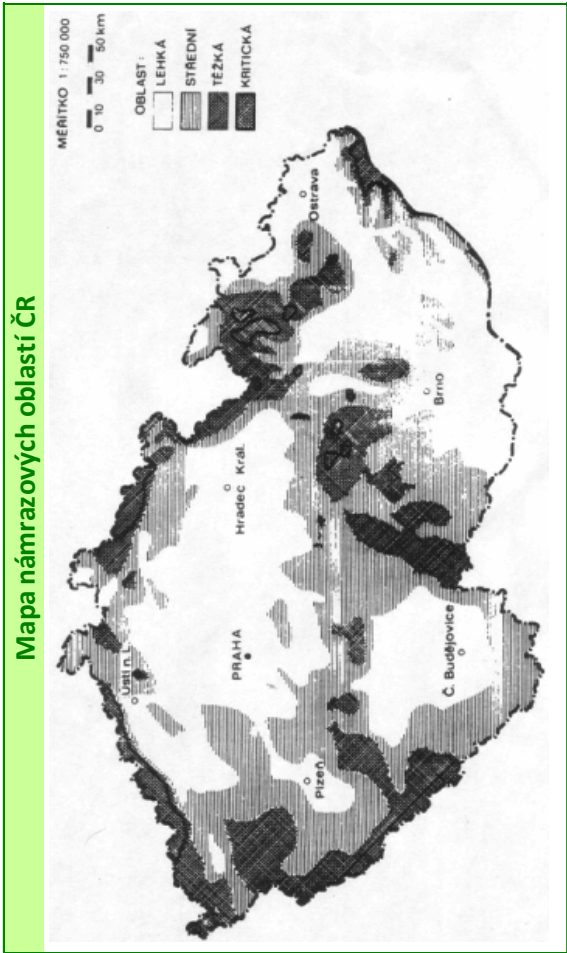
5.5 Kombinace zatížení větrem a námrazou

Postupu výpočtu se věnuje kapitola 4.3.4. Výpočet kombinace zatížení vychází z dříve provedených výpočtů zatížení větrem a námrazou. Z tohoto důvodu není potřeba žádného zásahu ze strany uživatele. List programu (Obr. 48) je rozdělen do dvou sloupců. V levém se nachází údaje ze záložek vstupní údaje, zatížení větrem a námrazou. Výpočet zatížení větrem a námrazou nemůže být použit samostatně, ale pouze v přímé návaznosti na výše zmíněné záložky.

V pravém sloupci proběhne výpočet podle normového postupu. Všechny proměnné jsou nastaveny na doporučené hodnoty. Výsledky jsou barevně vyznačeny. Směr působení výsledných sil je uvažován pod úhly maximálního působení větru, který je taktéž převzat z dříve provedeného výpočtu. O hodnotách přetížení vodiče opět platí, že jde o dvojici přídavných zatížení, která musí být použita v jednom zatěžovacím stavu.

ZA TÍŽENÍ NÁMRAZOU

Na vodiče podle ČSN 33 3300 (platné 05/1984 - 11/2002)



Vstupní parametry	
Námrazová oblast	L
Hmotnost normálního námrazku	$g_t = 1$
Průměr vodiče	$d = 21.35 \text{ mm}$
Tíha vodiče	$g_{t'} = 7.698 \text{ N/m}$

Pomocné výpočty	
Součinitel	$c_1 = 0.361$
Součinitel	$c_2 = 0.021$
Tloušťka námrazku	$t = 16.950 \text{ mm}$

Hmotnost námrazku na 1m vodiče	
Hmotnost námrazku	$g_2 = 0.816 \text{ kg/m}$
Hmotnost zvětšeného námrazku	$g_{2z} = 2.448 \text{ kg/m}$

Tíha přidavného zatížení	
Normální námrazou	$g_{2'} = 8.005 \text{ N/m}$
Zvětšeným námrazkem	$g_{2z'} = 24.016 \text{ N/m}$

Hodnota přetížení vodiče	
Normální námrazou	$z = 2.040$
Zvětšeným námrazkem	$z_z = 4.120$

Velikost námrazku	
Námrazová oblast	Hmotnost g_t [kg/m]
L	1
S	2
T	3
K	4

g_2 [kg/m]	<3	3-8	8-12	12-18	>18
g_{2z} [kg/m]	2.448	8.286	6.849	3.680	0.816

Obr. 47 – Výpočet zatížení námrazou dle ČSN 33 3300 [4]

KOMBINACE RYCHLOSTÍ VĚTRU A ZATÍŽENÍ NÁMRAZOU

1) Extrémní zatížení námrazou / τ kombinované s vysoce pravděpodobnou rychlostí větru V_{IH}

VSTUPNÍ ÚDAJE	
Úhel změny trasy	$\vartheta_1 = 0.1745^\circ$
Úhel změny trasy	$\vartheta_2 = 0.5236^\circ$
Úhel směru větru	$\varphi = 0.1745^\circ$
Rozpětí	$L_1 = 300 \text{ m}$
Rozpětí	$L_2 = 300 \text{ m}$
Průměrné rozpětí	$L_m = 300 \text{ m}$
Průměr lana	$d = 0.02135 \text{ m}$
Střední tlak větru	$q_{h(h)} = 315.52 \text{ N/m}^2$
Zatížení námrazou	$I_D = 10.54 \text{ N/m}$
Referenční výška	$h = 20 \text{ m}$
Parametr drsnosti terénu	$z_0 = 0.3 \text{ m}$

OSTATNÍ	
Součinitel kombinace	$\psi_{wc} = 0.25 -$
Hustota námrazy	$\rho_I = 500 \text{ kg/m}^3$
Součinitel aerodynamického odporu	$C_{IC} = 1.1 -$
Gravitační zrychlení	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Porybový součinitel	$G_q = 1.5429 -$
Dynamický součinitel	$G_c = 0.8323$

POMOCNÉ VÝPOČTY	
Dynamický tlak větru	$q_{hd} = 78.88 \text{ N/m}^2$
Ekvivalentní průměr vodiče s námrazou	$D = 0.0565 \text{ m}$

MAX. SÍLA VĚTRU NA PODPĚRNÝ BOD					
Ve směru konzoly	$Q_{wc_v1} = 1.543$	$Q_{wc_v1} = 1.491$	$Q_{wc_v1} = 1.515$		
Kólmno na konzolu	$Q_{wc_u1} = 0.099$	$Q_{wc_u1} = -0.096$	$Q_{wc_u1} = 0.289$		
Úhel působení větru	$\phi = 0.1745$	$\phi = 0.3491$	$\phi = 0.0000$		

PŘÍTÍŽENÍ VODIČEM					
Úhel větru	$\phi = 2.9671$	$\phi = 2.6180$	$\phi = 2.7925$		
Rovnom. zat. na 1. lano	$q_{wc_1max} = 6.295$	$q_{wc_1} = 5.559$	$q_{wc_1} = 6.105$		
Rovnom. zat. na 2. lano	$q_{wc_2} = 5.559$	$q_{wc_2max} = 6.295$	$q_{wc_2} = 6.105$		
Hodnota přetížení vodiče	$z_1 = 2.507$	$z_1 = 2.477$	$z_1 = 2.499$		
Vlivem větru	$z_2 = 2.477$	$z_2 = 2.507$	$z_2 = 2.499$		

2) Jmenovité zatížení námrazou / z_3 kombinované s málo pravděpodobnou rychlostí větru V_{IL}

Nemusí se uvažovat - dle NNA

Z. Neuwirthová - Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožary elektrického vedení

Obr. 48 – List výpočet zatížení vlivem kombinace větru a námrazy

5.6 Stavová rovnice

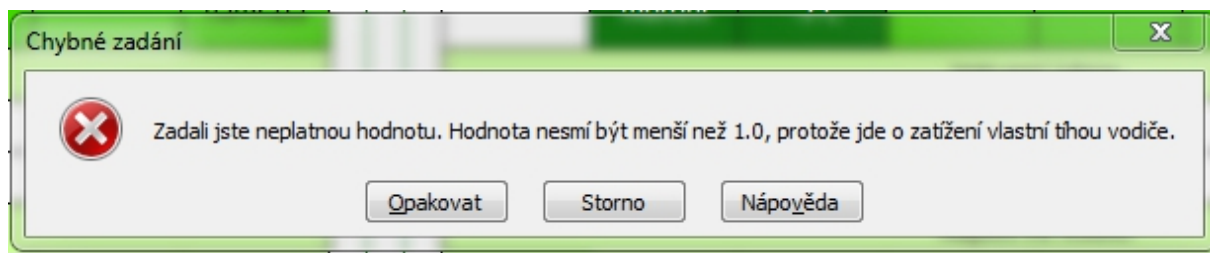
Vzorce potřebné pro vytvoření listu byly odvozeny v kapitole 3. Dialogové okno (Obr. 49) se skládá ze dvou totožných oblastí, každá slouží pro výpočet jednoho přilehlého pole. V horní části této oblasti se nachází rámeček s parametry vodiče, pokud je vyplněn list se vstupními parametry, jsou hodnoty aktualizovány automaticky. V opačném případě je možné dopsat parametry vodiče přímo v tomto listu. Za zmínku také stojí, že každé pole má vlastní oblast s parametry vodiče, což znamená, že program může být v této fázi využit i pro případy, kdy jsou v sousedních polích vodiče odlišných parametrů. Pod oblastí s charakteristikami vodiče lze spatřit parametry stavové rovnice A a B (48).

STAVOVÁ ROVNICE									
LEVÉ POLE					PRAVÉ POLE				
PARAMETRY VODIČE					PARAMETRY VODIČE				
Plocha	$S_1 =$	267.78 m ²			Plocha	$S_2 =$	267.78 m ²		
Rozpětí prvního pole	$L_1 =$	300 m			Rozpětí prvního pole	$L_2 =$	300 m		
Výškový rozdíl podpěrných bodů	$h_1 =$	20 m			Výškový rozdíl podpěrných bodů	$h_2 =$	-20 m		
Šikmá vzdálenost podpor	$l_{n1} =$	300.67 m			Šikmá vzdálenost podpor	$l_{n2} =$	300.67 m		
Modul pružnosti	$E_1 =$	88300 MPa			Modul pružnosti	$E_2 =$	88300 MPa		
Tíha vodiče	$g_1 =$	7.698 N/m			Tíha vodiče	$g_2 =$	7.698 N/m		
Tíha vodiče	$\gamma_1 =$	0.0287 N/m ³			Tíha vodiče	$\gamma_2 =$	0.0287 N/m ³		
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha_1 =$	1.88E-05 °C ⁻¹			Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha_2 =$	1.88E-05 °C ⁻¹		
VÝPOČET PARAMETRŮ					VÝPOČET PARAMETRŮ				
A_1 3.041 B_1 1.663					A_2 3.041 B_2 1.663				
	Výchozí stav při měření	Referenční teplota -5°C	-5°C, vítr	-5°C, námraza	Minimální teplota	Maximální teplota	-5°C, vítr, normální námraza		
Vstupní údaje									
a_1 [°C]	10°C	-5°C	40°C	-5°C	-30°C	40°C	-5°C		
z_2	1.000	1.000	1.569	2.369	1.000	1.000	2.507		
Napětí ve vodiči									
σ_{A1} [MPa]	233.40	257.44	196.03	273.81	297.96	186.37	275.90		
σ_B [MPa]	234.24	258.33	197.03	275.28	298.94	187.12	277.44		
σ_{A2} [MPa]	19.85	21.45	19.83	28.47	24.14	16.72	29.20		
Maximální průvěs									
f_m [m]	29.31	31.03	22.18	21.67	33.97	26.04	21.39		
Koncové síly lana									
F_H [kN]	62.50	68.94	52.49	73.32	79.79	49.91	73.88		
F_B [kN]	62.72	69.18	52.76	73.71	80.05	50.11	74.29		
F_{V2} [kN]	5.32	5.74	5.31	7.62	6.47	4.48	7.82		

Z. Neuwirthová - Statická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožáry elektrického vedení

Obr. 49 – List pro výpočet stavových rovnic

V dolní části se nachází tabulka sloužící pro výpočet jednotlivých zatěžovacích stavů (Obr. 51). V ní jsou nastaveny zatěžovací stavy předepsané normou a nachází se zde také výpočet pro referenční stav -5°C bez přidavného zatížení. Tyto buňky (Obr. 51) lze libovolně editovat, jak je ukázáno v kapitole 6.2. Pokud nejsou vyplněny na základě dříve uskutečněného výpočtu je potřeba zadat teplotu a přitížení vodiče získané například z výpočtu zatížení podle normy ČSN 33 3300 [4]. Hodnota přitížení 1,0 znamená zatížení pouze vlastní tíhou vodiče. Menší hodnota není přípustná. Při zadání menší hodnoty se zobrazí chybové hlášení (Obr. 50).



Obr. 50 – Chybové hlášení

Záložka s názvem: „Stavová rovnice“ je užitečná zejména v případě posouzení napjatosti vodiče. Pro samotné posouzení konstrukce je nezbytné zohlednit také nesymetrické zatěžovací stavy.

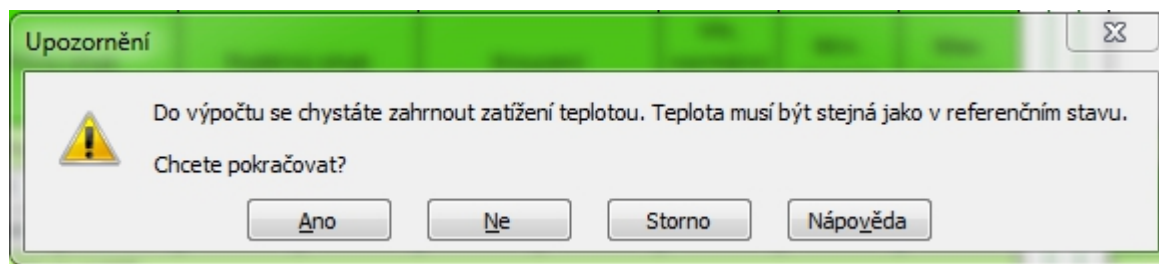
	Výchozí stav při měření	Referenční teplota -5°C	-5°C, vítr	-5°C, námraza	Minimální teplota	Maximální teplota	-5°C, vítr, normální námraza
Vstupní údaje							
s_1 [°C]	10°C	-5°C	40°C	-5°C	-30°C	40°C	-5°C
z_1	1.000	1.000	2.027	2.369	1.000	1.000	2.582
Napětí ve vodiči							
σ_{h1} [MPa]	20.10	20.48	38.82	47.55	21.15	19.41	51.66
σ_B [MPa]	20.90	21.27	40.49	49.44	21.93	20.23	53.72
σ_{VB} [MPa]	5.72	5.75	11.48	13.55	5.79	5.68	14.76
Maximální průvės							
f_m [m]	27.78	27.51	28.53	27.81	27.05	28.32	27.86
Koncové síly lana							
F_H [kN]	5.38	5.48	10.40	12.73	5.66	5.20	13.83
F_B [kN]	5.60	5.70	10.84	13.24	5.87	5.42	14.39
F_{VB} [kN]	1.53	1.54	3.07	3.63	1.55	1.52	3.95

Obr. 51 – Výpočet jednotlivých zatěžovacích stavů

5.7 Výpočty účinků jednotlivých zatížení

Výsledkem předchozí kapitoly je napětí lana, průhyb a síly působící na stožár způsobené danými kombinacemi zatížení. Použité kombinace jsou definovány v normě a používají se převážně pro posouzení napjatosti vodiče. Vždy se jedná o účinek vlastní tíhy v kombinaci s klimatickými vlivy. Ze statického hlediska je výhodnější znát účinky jednotlivých zatížení na stožár, které lze libovolně kombinovat například ve výpočtovém softwaru. Účinky jednotlivých zatížení najdeme pod záložkou s názvem: „Účinky zatížení.“

Účinky zatížení jsou zjišťovány pomocí stavové rovnice (48). Nejprve je zvolen referenční stav (vlastní tíha při teplotě -5°C). Dále je vodič zatěžován rovnoměrnou a nerovnoměrnou námrazou a větrem pod různými úhly opět při teplotě -5°C . Je nutné, aby tato teplota byla stejná jako v referenčním stavu. Pokud uživatel zadá jinou teplotu, objeví se upozornění (Obr. 52). Účinky teploty jsou řešeny obdobně, ale v tomto případě je vodič zatěžován pouze teplotou, nikoliv přídatným zatížením. Zadání přetížení vodiče je opět ošetřeno upozorněním.



Obr. 52 - Upozornění

Výsledkem rozdílu řešeného zatěžovacího stavu a referenčního stavu jsou účinky způsobené přídatným zatížením oproti referenčnímu stavu (Obr. 54). Výpočet je proveden samostatně pro každé pole. Hodnoty působící na stožár z obou polí je možné vyčíst z karty výsledky.

	Standardní zatěžovací stavy - normativní
1a	Zatížení větrem
2a	Rovnoměrné zatížení námrazou ve všech rozpětích
2b	Rovnoměrné zatížení námrazou, příčný ohyb
2c	Nerovnoměrné zatížení námrazou, podélný ohyb
2d	Nerovnoměrné zatížení námrazou, kroucení
3	Kombinované zatížení větrem a námrazou
4	Minimální teplota s nebo bez zatížení větrem
5a	Zabezpečovací zatížení, torzní zatížení
5b	Zabezpečovací zatížení, podélná zatížení
6a	Bezpečnostní zatížení, montážní a údržbová zatížení
6b	Bezpečnostní zatížení, zatížení, která se vztahují k tíze montérů

Obr. 53 – Zatěžovací stavy pro mezní stav únosnosti

LEVÉ POLE														
PARAMETRY VODIČE														
Plocha		S _I = 267.78 m ²												
Rozpětí prvního pole		L _I = 300 m												
Výškový rozdíl podpěrných bodů		h _I = 20 m												
Šikmá vzdálenost podpor		l _{nd} = 300.67 m												
Modul pružnosti		E _I = 88300 MPa												
Tíhla vodiče		g _I ´ = 7.698 N/m												
Tíhla vodiče		γ _I ´ = 0.0409 N/m ³												
Koeficient tepelné roztažnosti		α _I = 1.88E-05 °C ⁻¹												
VÝPOČET PARAMETRŮ														
A _I		6.166						B _I 1.663						
												</		

Obr. 54 – Výpočet sil působících od jednotlivých zatížení

5.1 Výsledky

Výstupem programu jsou síly vznikající vlivem jednotlivých zatížení na lana elektrického vedení (tudíž bez vlastní tíhy vodiče), což představuje nejjednodušší způsob pro přenos do výpočtového softwaru. Potom lze zatížení libovolně kombinovat. Norma předepisuje 6 skupin kombinací pro posouzení v mezním stavu únosnosti (Obr. 53).

Kvůli přehlednosti jsou výsledky rozděleny do tří záložek podle způsobu, jak zatížení na konstrukci působí a jakým způsobem bude zadáváno do výpočtového softwaru. V první záložce (Obr. 55) jsou umístěny účinky rovnoměrných stavů ať již od vlastní tíhy, tepelné roztažnosti nebo rovnoměrné námrazy, pro které je společné, že rovnoměrné zatížení působící na lana je pro obě pole stejné. Pro jednotlivá zatížení jsou rozepsány účinky působící na každé lano samostatně a také celkové síly působící na stožár. Znaménková konvence a směr působení sil jsou pro lepší orientaci znázorněny v pravé části graficky.

Druhá karta s výsledky se věnuje nerovnoměrnému působení námrazou. Při jejím působení může docházet k příčnému a podélnému ohybu nebo kroucení. Při zatížení nerovnoměrnou námrazou je potřeba správným způsobem zatížit všechny vodiče umístěné na stožáru. Způsob zatěžování vodičů je znázorněn na obrázcích převzatých z normy (Obr. 56) [3], výsledky obsahují obě varianty, kterými lze zatížit každé pole vodiče. U těchto zatěžovacích stavů je potřeba dbát zvýšené pozornosti při aplikaci výsledků.

Třetí záložka s výsledky se věnuje účinkům větru a to jak na omrzlý tak i neomrzlý vodič (Obr. 57). Při zatížení větrem působí na každé lano jinak velká složka větru. Výjimku tvoří přímé vedení trati. Z výpočtu zatížení větrem byly vybrány tři úhly větru, které vytváří nejhorší účinky. Pro každý směr větru je spočten úhel β , který definuje vychýlení vodiče od svislice vlivem větru (Obr. 3). Svislá složka sil i průhyb získaný ze stavové rovnice totiž nepůsobí pro tento případ svisle, nýbrž pod úhlem β . Pomocí goniometrických funkcí je spočtena svislá síla působící na stožár a tahová složka kolmá k vodiči ve vodorovném směru. Tyto hodnoty jsou spočteny pro každé lano samostatně. Na závěr je vyjádřen celkový účinek všech sil působících na řešený stožár. Složky sil jsou transformované do směru podélného a kolmého na konzolu stožáru. Pro případ omrzlého vodiče je postup totožný. Výpočty jsou doplněny grafickým zobrazením sil pro lepší názornost a rychlejší orientaci uživatele.

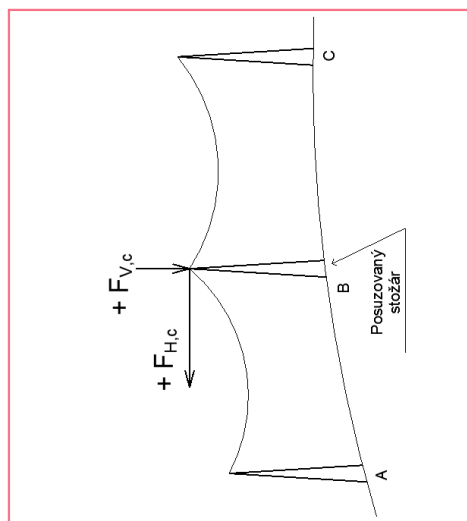
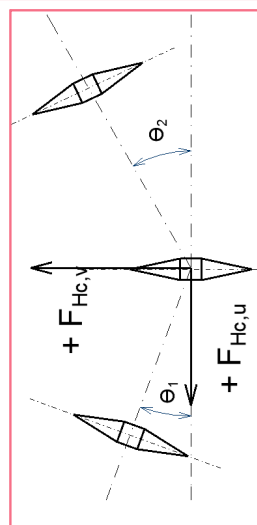
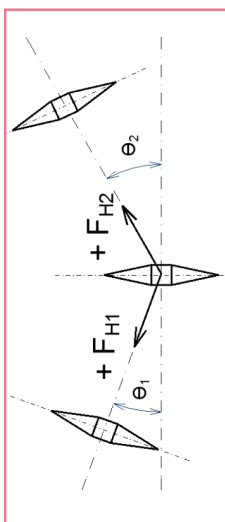
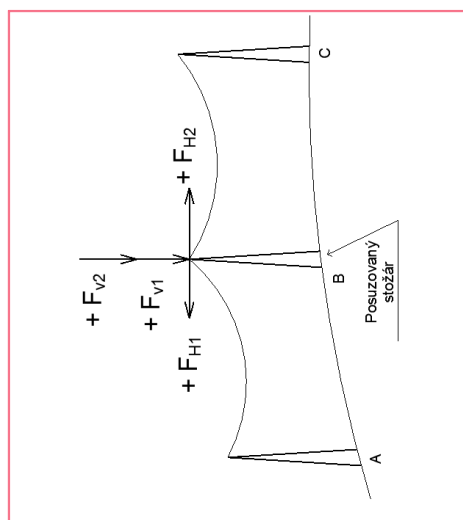
SÍLY PŮSOBÍCÍ NA STOŽÁR OD JEDNOTLIVÝCH ZATÍŽENÍ (BEZ VLASTNÍ TÍHY)

VLASTNÍ TÍHA VODIČE	
Charakteristická hodnota zatížení	
• Vodorovné síly	
Od levého pole	$F_{H1} = 5.484 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{H2} = 5.484 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Hc,u} = 0.651 \text{ kN}$
$F_{Hc,v} = 3.694 \text{ kN}$	
• Svislé síly	
Od levého pole	$F_{V1} = 1.539 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{V2} = 1.539 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Vc} = 3.077 \text{ kN}$

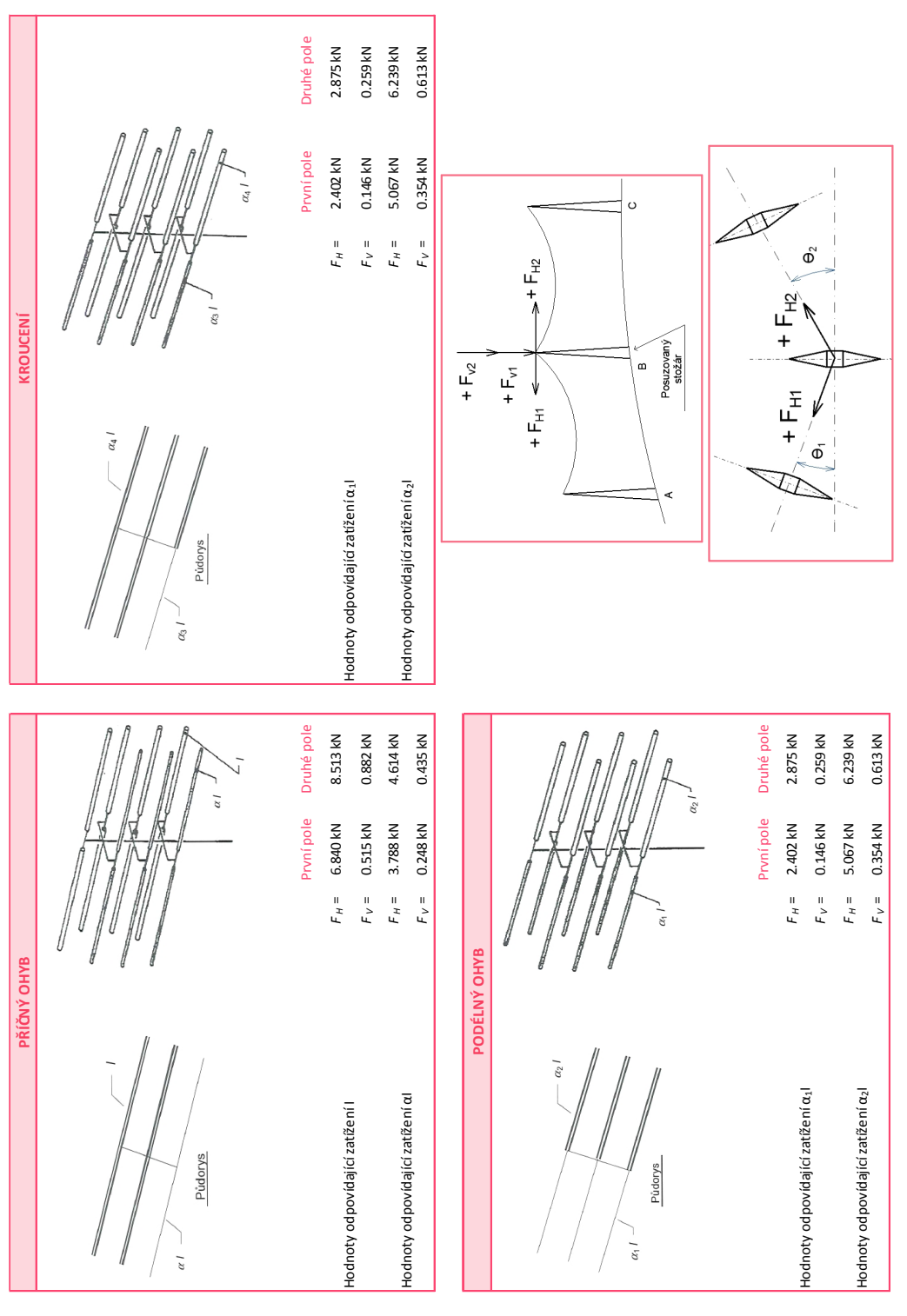
TEPELNÁ ROZTAŽNOST (MIN. TEPLOTA)	
Charakteristická hodnota zatížení	
• Vodorovné síly	
Od levého pole	$F_{H1} = 0.180 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{H2} = 0.180 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Hc,u} = 0.021 \text{ kN}$
$F_{Hc,v} = 0.122 \text{ kN}$	
• Svislé síly	
Od levého pole	$F_{V1} = 0.011 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{V2} = 0.011 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Vc} = 0.022 \text{ kN}$

TEPELNÁ ROZTAŽNOST (MAX. TEPLOTA)	
Charakteristická hodnota zatížení	
• Vodorovné síly	
Od levého pole	$F_{H1} = -0.286 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{H2} = -0.286 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Hc,u} = 0.000 \text{ kN}$
$F_{Hc,v} = 0.000 \text{ kN}$	
• Svislé síly	
Od levého pole	$F_{V1} = -0.018 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{V2} = -0.018 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Vc} = -0.035 \text{ kN}$

ROVNOMĚRNÁ NÁMRAZA	
Návrhová hodnota zatížení	
• Vodorovné síly	
Od levého pole	$F_{H1} = 7.248 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{H2} = 7.248 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Hc,u} = 0.861 \text{ kN}$
$F_{Hc,v} = 4.883 \text{ kN}$	
• Svislé síly	
Od levého pole	$F_{V1} = 2.091 \text{ kN}$
Od pravého pole	$F_{V2} = 2.091 \text{ kN}$
Celková síla	$F_{Vc} = 4.182 \text{ kN}$



Obr. 55 – Grafické rozhraní záložky: „Výsledky 1“



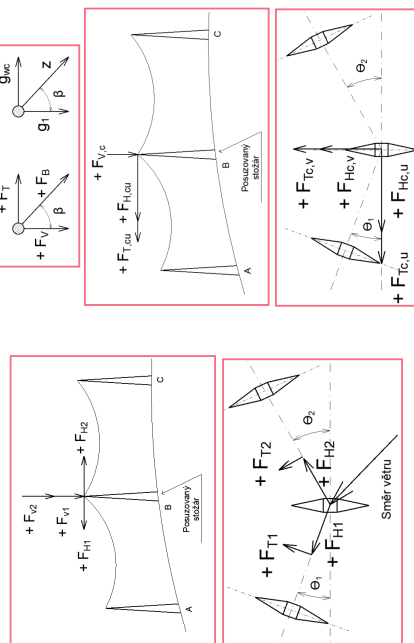
Obr. 56 – Výsledek nerovnoměrného působení námrazy

Pozn.: Při zatížení nerovnoměrnou námrazou nejsou účinky skládány ve směru konzoly a kolmo na konzolu a to z toho důvodu, že si uživatel může vybrat, jakým způsobem bude zatěžovat lano v prvním a druhém poli. V tomto případě by skládání účinků mohlo vést ke zbytečným komplikacím. Při zadávání sil do výpočtového softwaru je třeba zadat síly pod úhlem odpovídající směru lan.

SÍLY PŮSOBÍCÍ NA STOŽÁR OD JEDNOTLIVÝCH ZATÍŽENÍ (BEZ VLASTNÍ TÍHY)

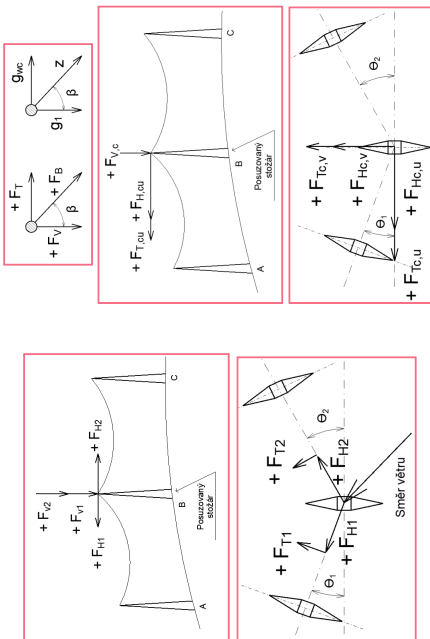
ÚČINKY VĚTRU Charakteristická hodnota zatížení

Vlét kolmo na levé pole		Vlét kolmo na pravé pole	
<ul style="list-style-type: none"> Levé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Levé pole 	
$q_{w,z} = 16,702$	$q_{w,z} = 16,199$	$q_{w,z} = 14,748$	
Úhel $\beta = 65,26^\circ$	Úhel $\beta = 64,58^\circ$	Úhel $\beta = 62,44^\circ$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 15471,489 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 14862,212 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 13121,955 \text{ N}$	
Šikmá síla $F_{H2} = 3766,322 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 3610,788 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 3166,120 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = 3420,501 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3261,257 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 2806,786 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{V1} = 1576,500 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 1549,838 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 1465,015 \text{ N}$	
<ul style="list-style-type: none"> Pravé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Pravé pole 	
$q_{w,z} = 2,161$	$q_{w,z} = 16,199$	$q_{w,z} = 2,389$	
Úhel $\beta = 15,68^\circ$	Úhel $\beta = 64,58^\circ$	Úhel $\beta = 17,24^\circ$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 11161,084 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 12695,771 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 13230,551 \text{ N}$	
Šikmá síla $F_{H2} = 2982,970 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 3408,138 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 3557,120 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = 806,274 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3072,231 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3054,330 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{V1} = 2871,939 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 1462,856 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 3397,277 \text{ N}$	
<ul style="list-style-type: none"> Celkový účinek 		<ul style="list-style-type: none"> Celkový účinek 	
Svislá síla $F_V = 4448,439 \text{ N}$	Svislá síla $F_V = 3012,694 \text{ N}$	Svislá síla $F_V = 4862,293 \text{ N}$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 5570,620 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 3645,501 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 1464,610 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{H2} = 8267,131 \text{ N}$	Svislá složka $F_{H2} = 8928,376 \text{ N}$	Svislá složka $F_{H2} = 8893,879 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = -190,827 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 972,800 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 39,772 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T2} = 4066,700 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T2} = 5877,531 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T2} = 3677,221 \text{ N}$	



ÚČINKY KOMBINACE VĚTRU A NÁMRAZY Charakteristická hodnota zatížení

Vlét kolmo na levé pole		Max. účinek větru v obecném směru		Vlét kolmo na pravé pole	
<ul style="list-style-type: none"> Levé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Levé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Levé pole 	
$q_{1+2} = 18,24$	$q_{1+2} = 18,24$	$q_{1+2} = 18,24$		$q_{1+2} = 18,24$	
Úhel $\beta = 51,18^\circ$	Úhel $\beta = 51,18^\circ$	Úhel $\beta = 51,18^\circ$		Úhel $\beta = 51,18^\circ$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 19137,144 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 1845,935 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 1845,935 \text{ N}$		Vodorovná síla $F_{H1} = 1845,935 \text{ N}$	
Šikmá síla $F_{H2} = 4721,716 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 4513,777 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 4513,777 \text{ N}$		Šikmá síla $F_{H2} = 4513,777 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = 3849,199 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3516,076 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3516,076 \text{ N}$		Tahová síla $F_{T1} = 3516,076 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{V1} = 2734,641 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 2829,376 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 2829,376 \text{ N}$		Svislá složka $F_{V1} = 2829,376 \text{ N}$	
<ul style="list-style-type: none"> Pravé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Pravé pole 		<ul style="list-style-type: none"> Pravé pole 	
$q_{w,z} = 10,935$	$q_{w,z} = 10,935$	$q_{w,z} = 10,935$		$q_{w,z} = 10,935$	
Úhel $\beta = 51,18^\circ$	Úhel $\beta = 51,18^\circ$	Úhel $\beta = 51,18^\circ$		Úhel $\beta = 51,18^\circ$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 15786,312 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 1692,612 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 1692,612 \text{ N}$		Vodorovná síla $F_{H1} = 1692,612 \text{ N}$	
Šikmá síla $F_{H2} = 4274,673 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 4875,025 \text{ N}$	Šikmá síla $F_{H2} = 4875,025 \text{ N}$		Šikmá síla $F_{H2} = 4875,025 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = 3330,538 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3648,094 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 3648,094 \text{ N}$		Tahová síla $F_{T1} = 3648,094 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{V1} = 2679,617 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 2991,767 \text{ N}$	Svislá složka $F_{V1} = 2991,767 \text{ N}$		Svislá složka $F_{V1} = 2991,767 \text{ N}$	
<ul style="list-style-type: none"> Celkový účinek 		<ul style="list-style-type: none"> Celkový účinek 		<ul style="list-style-type: none"> Celkový účinek 	
Svislá síla $F_V = 5414,258 \text{ N}$	Svislá síla $F_V = 5421,143 \text{ N}$	Svislá síla $F_V = 5421,143 \text{ N}$		Svislá síla $F_V = 5421,143 \text{ N}$	
Vodorovná síla $F_{H1} = 5176,927 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 3784,198 \text{ N}$	Vodorovná síla $F_{H1} = 3784,198 \text{ N}$		Vodorovná síla $F_{H1} = 3784,198 \text{ N}$	
Svislá složka $F_{H2} = 11215,786 \text{ N}$	Svislá složka $F_{H2} = 11832,044 \text{ N}$	Svislá složka $F_{H2} = 11832,044 \text{ N}$		Svislá složka $F_{H2} = 11832,044 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T1} = 996,853 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 1213,383 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T1} = 1213,383 \text{ N}$		Tahová síla $F_{T1} = 1213,383 \text{ N}$	
Tahová síla $F_{T2} = 6675,052 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T2} = 6622,592 \text{ N}$	Tahová síla $F_{T2} = 6622,592 \text{ N}$		Tahová síla $F_{T2} = 6622,592 \text{ N}$	



Z. Newirthová - Statika analýza, inženýrské konstrukce - účinky na střešní konstrukce a větrání

Obr. 57 – Výsledky zatěžovacích stavů při působení větru

6 Praktická ukázka na řešeném příkladu

6.1 Varianta A

Zadání pomocí naměřených hodnot v terénu na stávajícím stožáru. Cílem této kapitoly je porovnat údaje z bakalářské práce Veroniky Dybalové [15] a výsledky z navržené výpočetní pomůcky.

Základní údaje

Posouzení stožáru VN 180/97 na trase vedení mezi Třebovicemi a Mariánskými Horami v Ostravě. Jedná se o koncový stožár. Na stožáru se nachází zemní lano (Fe), fázové vodiče (AlFe6) a optické lano (F-1200). Oba stožáry jsou v jedné rovině. Pro tuto práci bylo vybráno zemní lano, stejně jako v předloze příkladu [15], u ostatních lan by byl postup obdobný.

Vstupní parametry:

Rozpětí pole	$L_1 = 205,5 \text{ m}$
Výška stožáru	$h = 21,1 \text{ m}$
Maximální průvěs	$f_m = 3,1 \text{ m}$
Teplota	$T = 10 \text{ °C}$

Parametry použitého vodiče (zemní lano):

Průměr	$d = 8 \text{ mm}$
Průřez	$S = 50,27 \text{ mm}^2$
Jmenovitá měrná hmotnost	$g = 206 \text{ kg/km}$
Modul pružnosti	$E = 210\,000 \text{ MPa}$
Koeficient teplotní roztažnosti	$\alpha = 12,00 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Řetězovka

Výsledky:

	①	②
Parametr řetězovky	$c = 1702,83 \text{ m}$	$c = 1702,83 \text{ m}$

Síly působící na závěs vodiče (vlastní tíha při aktuální zatěžovací situaci (10°C, bezvětrí))

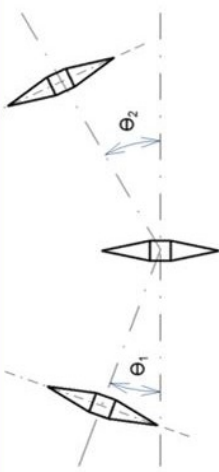
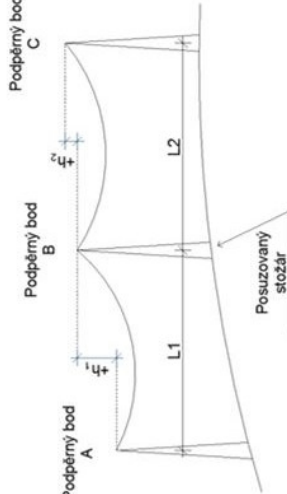
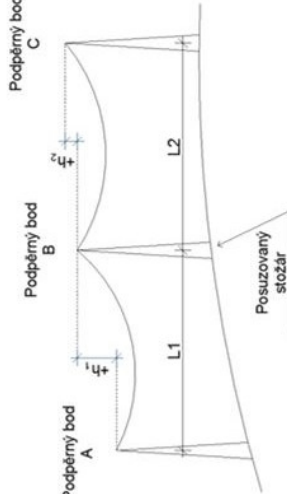
Horizontální síla	$F_H = 3,504 \text{ kN}$	$F_H = 3,508 \text{ kN}$
Vertikální síla	$F_V = 0,212 \text{ kN}$	$F_V = 0,212 \text{ kN}$

① Výsledky podle předlohy [15]

② Výsledky podle programu vytvořeného v rámci této diplomové práce

VSTUPNÍ PARAMETRY

VODIČ	
Označení vodiče	Fe 50
Plocha	$S = 50.27 \text{ mm}^2$
Průměr lana	$d = 8 \text{ mm}$
Modul pružnosti	$E = 210000 \text{ MPa}$
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha = 0.000120 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$
Tíha vodiče	$g_1' = 2.06 \text{ N/m}$
Tíha vodiče	$\gamma' = 0.0410 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{m)}$
Napětí ve vodiči v zákl. stavu	$\sigma_{h0} = \text{MPa}$
OSTATNÍ ÚDAJE	
Teplota vzduchu při měření	$T = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
Úroveň spolehlivosti	1

GEOMETRIE	
<ul style="list-style-type: none"> Půdorysné rozložení trasy 	
Úhel změny trasy	$\theta_1 = 0^\circ$
Úhel změny trasy	$\theta_2 = 0^\circ$
<ul style="list-style-type: none"> Rozpětí 	
Rozpětí prvního pole	$L1 = 205.5 \text{ m}$
Rozpětí druhého pole	$L2 = 0 \text{ m}$
<ul style="list-style-type: none"> Výškový profil trasy 	
Výška uložení vodiče na posuzovaném stožaru	$v = 21.1 \text{ m}$
Výškový rozdíl umístění podpěrných bodů	$h1 = 0 \text{ m}$
	$h2 = 0 \text{ m}$

Z. Neuvěřitelná - Statistická analýza lanové konstrukce - účinky lan na stožary elektrického vedení

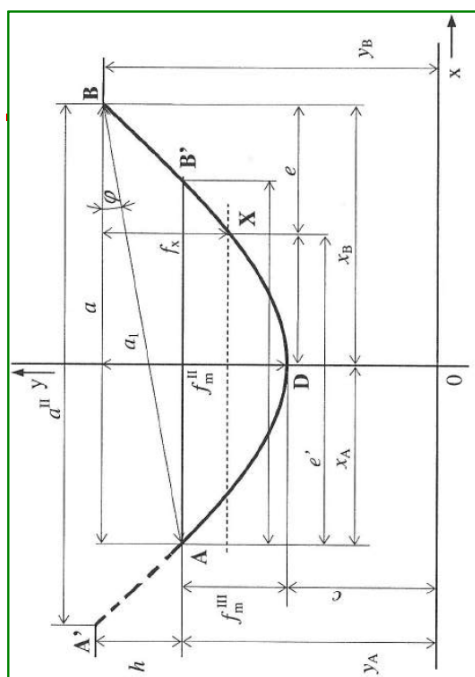
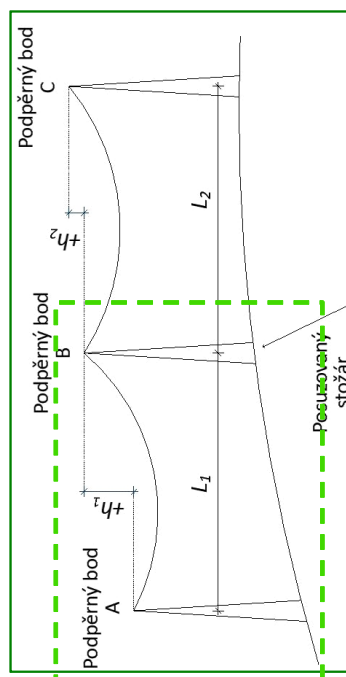
Obr. 58 – Zadání vstupních parametrů

NESOUMĚRNÁ ŘETĚZOVKA

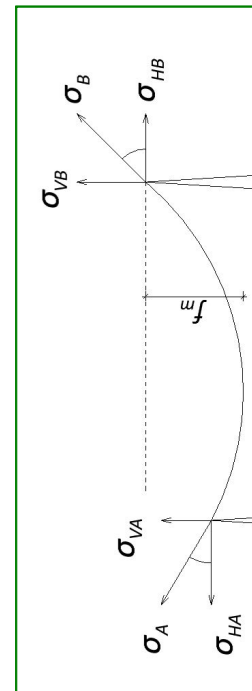
ZADÁNÍ PRVNÍHO POLE (LEVÉ POLE)

Výškové kóty	
Výšková kóta výše uloženého podpěrného bodu	_____ m n.m.
Výšková kóta nejnižšího místa lana	_____ m n.m.
Geometrie	
Rozpětí	$a = L = 205.5 \text{ m}$
Průhyb	$f_m = 3.1 \text{ m}$
Výškový rozdíl uložení úchytných bodů	$h = 0 \text{ m}$
Přetížení vodiče při měření	
Hodnota přidavného zatížení lana	$z = 1$

CHARAKTERISTIKY	
Parametr řetězovky	
$a_1 =$	1702.833 m
$a_2 =$	Není definován m
$a =$	1702.833 m
Vzdálenosti	
$x_b =$	102.750 m
$x_a =$	102.750 m
$y_a =$	1705.934 m
$y_b =$	1705.934 m
Délka lana	
$l_s =$	205.625 m
Šikmá vzdálenost podpor	
$l_n =$	205.500 m
Průhyb	
$f_m =$	3.101 m
Chyba při zpětném výpočtu f_m	
	0.030%



SLOŽKY MECH. NAPĚTÍ	
$\sigma_B =$	69.839 MPa
$\sigma_{VB} =$	4.209 MPa
$\sigma_H =$	69.712 MPa
SÍLY	
$F_B =$	3.511 kN
$F_{VB} =$	0.212 kN
$F_H =$	3.508 kN



Obr. 59 – Výpočet parametrů řetězovky

Zatížení větrem

Vstupní údaje:

Větrná oblast II

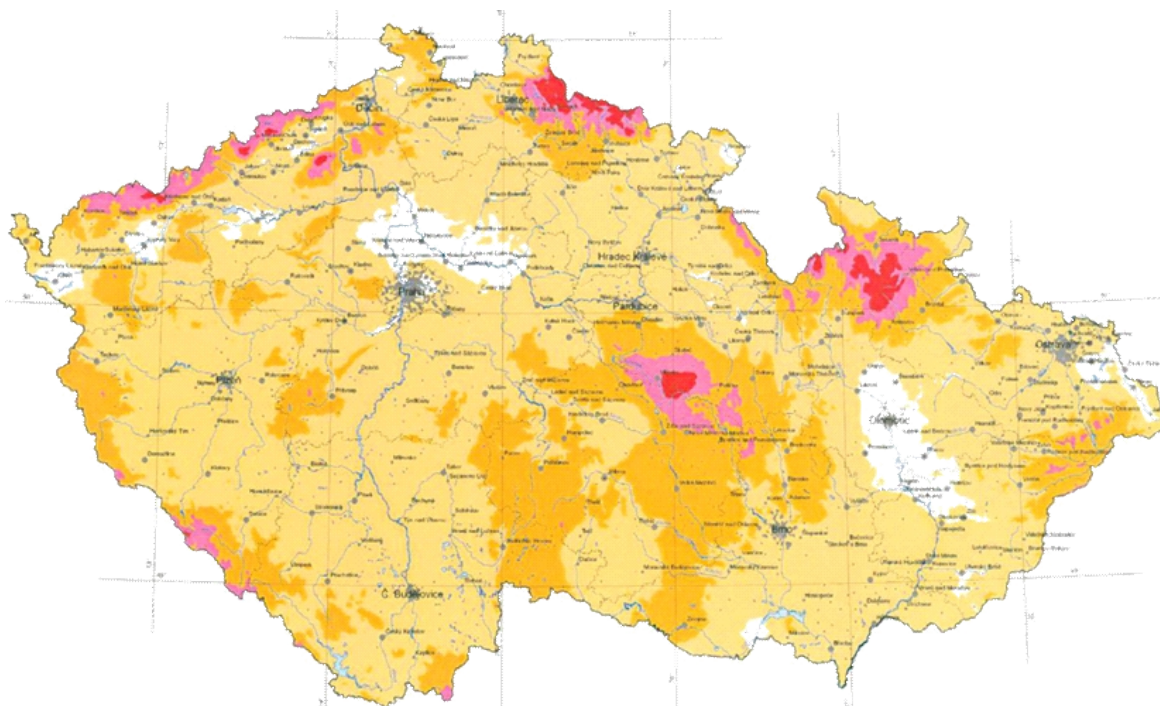
Kategorie terénu III

Referenční výška vodičů $H = 12,66 \text{ m}$

Hustota vzduchu $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Referenční výška $h = 15,52 \text{ m}$

MAPA VĚTRNÝCH OBLASTÍ NA ÚZEMÍ ČR



Oblast

I	II	III	IV	V

Výchozí základní rychlost větru $v_{b,0}$

22.5	25	27.5	30	36
------	----	------	----	----

Zvolte větrnou oblast podle mapy ČR:

II

Zvolte kategorii terénu:

3

Obr. 60 – Zadání údajů

Výsledky:

Střední rychlost v referenční výšce

① $v_{h(h)} = 20,02 \text{ m/s}$

② $v_{h(h)} = 20,02 \text{ m/s}$

Střední tlak větru v ref. výšce

① $q_{h(h)} = 245,54 \text{ N/m}^2$

② $q_{h(h)} = 245,54 \text{ N/m}^2$

Intenzita turbulence

① $I_{v(h)} = 0,27$

② $I_{v(h)} = 0,267$

Maximální tlak větru

① $q_{p(h)} = 704,80 \text{ N/m}^2$

② $q_{p(h)} = 704,80 \text{ N/m}^2$

Nejprve byla zadána II větrná oblast a kategorie terénu 3 (Obr. 60), dále byla přepsána referenční výška, která byla spočtena pomocí jiného postupu a hustota vzduchu (Obr. 61).

ZATÍŽENÍ VĚTREM

VSTUPNÍ ÚDAJE

Referenční výška	$h =$	12.66 m
Výška nad zemí	$z =$	12.66 m
Hustota vzduchu	$\rho =$	1.225 kg/m ³

Větrná oblast	II
Kategorie terénu	3

HODNOTY ZÁVISEJÍCÍ NA UMÍSTĚNÍ STAVBY

Základní rychlost větru	$v_{b,0} =$	25 m/s
Součinitel terénu	$k_r =$	0.214
Parametr drsnosti terénu	$z_0 =$	0.3 m
Minimální výška	$z_{min} =$	5

SOUČiniteLE

Součinitel ortografie	$c_o(z) =$	1
Součinitel směru	$c_{dir} =$	1

VÝPOČET

Střední rychlost větru	$v_h(h) =$	20.02 m/s
Střední tlak větru	$q_h(h) =$	245.54 N/m ²
Intenzita turbulence	$I_v(h) =$	0.2672
Maximální tlak větru	$q_p(h) =$	704.80 N/m ²

Obr. 61 – Zadání údajů a výpočet

Není nutné využít celý výpočet zatížení, ale je možno zadat přímo výsledky zatížení a díky nim získat síly působící na závěsy stožáru (Obr. 62).

Vstupní údaje:

Referenční výška vodičů	$H = 15,52 \text{ m}$
Střední rychlost větru	$v_{h(h)} = 21,11 \text{ m/s}$
Střední tlak větru	$q_{h(h)} = 240,68 \text{ N/m}^2$
Intenzita turbulence	$I_{v(h)} = 0,25$
Maximální tlak větru	$q_{p(h)} = 667,63 \text{ N/m}^2$

Výsledky:

	①	②
Střední rychlost v referenční výšce	$Q_{wc_v} = 0,36 \text{ kN}$	$Q_{wc_v} = 0,361 \text{ kN}$

VÝPOČET		
Střední rychlost větru	$v_h(h) =$	21.11 m/s
Střední tlak větru	$q_h(h) =$	240.68 N/m ²
Intenzita turbulence	$I_v(h) =$	0.2500
Maximální tlak větru	$q_p(h) =$	667.63 N/m ²

SÍLY VĚTRU NA VODIČE

VSTUPNÍ ÚDAJE		
Referenční výška	$h =$	15.52 m
Úhel změny trasy	$\vartheta_1 =$	0 °
Úhel změny trasy	$\vartheta_2 =$	0 °
Úhel směru větru	$\varphi =$	0 °
Rozpětí	$L_1 =$	205.5 m
Rozpětí	$L_2 =$	0 m
Průměrné rozpětí	$L_m =$	102.75 m
Průměr kabelu	$d =$	0.008 m

SOUČiniteLE		
Součinitel maximální hodnoty	$k_p =$	3
Součinitel odezvy pozadí	$B^2 =$	0.2905
Součinitel rezonanční části odezvy	$R^{2*} =$	0
Součinitel konstrukce	$G_c =$	0.6576
Součinitel aerodynamického odporu	$C_c =$	1

POMOCNÉ VÝPOČTY		
Měřítka délky turbulence	$L(h) =$	63.12 m
Reynoldsovo číslo	$Re =$	2.2E+06
Kinematická viskozita vzduchu	$\nu =$	0.000015 m ² /s

SÍLA VĚTRU NA PODPĚRNÝ BOD		
Ve směru konzoly	$Q_{wc_v1} =$	0.361 kN
Kolmo na konzolu	$Q_{wc_u1} =$	0.000 kN

Obr. 62 – Výpočet síly větru na podpěrný bod

V případě, že uživatel nevyužívá celý výpočet, ale zná střední rychlost větru, střední tlak větru, intenzitu turbulence a maximální tlak větru, je možno doplnit také referenční výšku v této fázi výpočtu (Obr. 62). Tento postup má své opodstatnění při postupu stanovení základní rychlosti větru pomocí statistických údajů (Obr. 19).

Zatížení námrazou

Vstupní údaje:

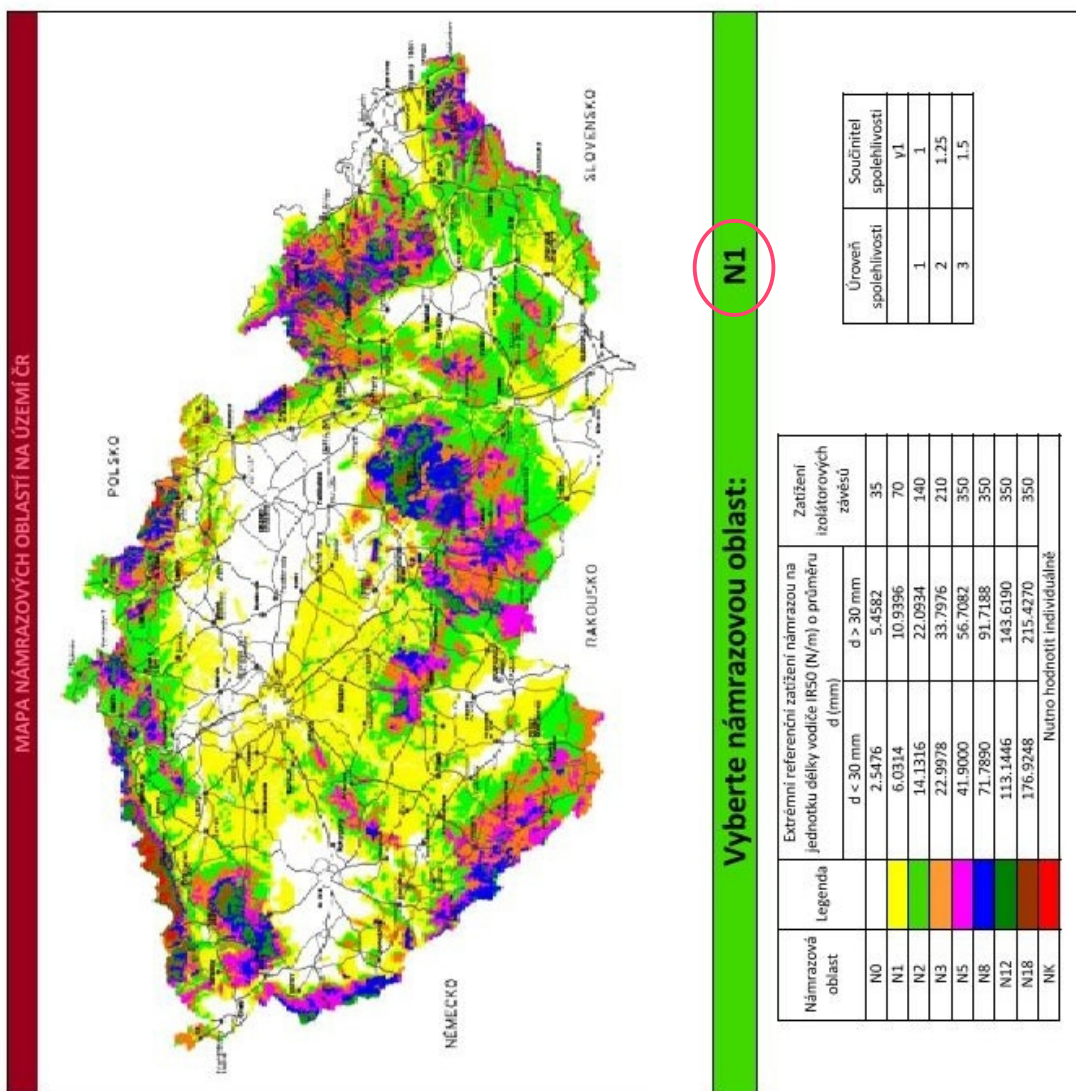
Námrazová oblast N1

Výsledky:

	①	②
Svislé zatížení způsobené námrazou	$Q_l = 0,68 \text{ kN}$	$Q_l = 0,68 \text{ kN}$
Hodnota přitížení vodiče	$z_1 = 4,23$	$z_1 = 4,23$

V programu stačí zvolit kategorii námrazové oblasti (Obr. 63). Ostatní vstupní údaje jsou automaticky vyplněny na základě karty vstupní údaje.

ZATÍŽENÍ NÁMRAZOU



VSTUPNÍ ÚDAJE	
Průměr kabelu	$d = 0.0080 \text{ m}$
Referenční výška	$h = 21.10 \text{ m}$
Rozpětí 1. pole	$L_1 = 205.50 \text{ m}$
Rozpětí 2. pole	$L_2 = 0.00 \text{ m}$

ZATÍŽENÍ NÁMRAZOU	
Referenční zatížení námrazou	$I_{R50} = 6.03 \text{ N/m}$
Charakteristické zatížení námrazou	$I_k = 6.65 \text{ N/m}$
Návrhové zatížení námrazou	$I_d = 6.65 \text{ N/m}$

POMOCNÉ VÝPOČTY	
Koeficient výšky pro zat. námrazou	$K_1(h) = 1.10$
Úroveň spolehlivosti	1 -
Součinitel spolehlivosti	1.00 -
Váhové délky přilehlých rozpětí	$L_{w1} = 102.75 \text{ m}$
	$L_{w2} = 0.00 \text{ m}$

SILA VĚTRU NA PODPĚRNÝ BOD	
Svislé zatížení námrazou ze dvou sousedních polí, kterým působí na podpěrný bod každý z dílčích vodičů	$Q_1 = 0.68 \text{ kN}$

Hodnota přítlaku vlivem námrazy	$z_t = 4.23$
---------------------------------	--------------

Obr. 63 – Zadání při výpočtu zatížení námrazou

Stavová rovnice

Vzhledem k tomu, že je již vyplněn list vstupní údaje i výpočty zatížení, jsou všechny buňky vyplněny automaticky a není potřeba nic dopisovat ručně.

PARAMETRY VODIČE			
Plocha	$S_1 =$	50.27	m ²
Rozpětí prvního pole	$L_1 =$	205.5	m
Výškový rozdíl podpěrných bodů	$h_1 =$	0	m
Šikmá vzdálenost podpor	$l_{n1} =$	300.67	m
Modul pružnosti	$E_1 =$	210000	MPa
Tíha vodiče	$g_1' =$	2.058	N/m
Tíha vodiče	$\gamma_1' =$	0.0409	N/m ³
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha_1 =$	1.20E-05	°C ⁻¹

VÝPOČET PARAMETRŮ			
A_1	14.665	B_1	2.520

Obr. 64 – Charakteristiky vodiče

	Výchozí stav při měření	-5°C Referenční teplota	-5°C, vítr	-5°C, námraza	-36°C	+38°C
Vstupní údaje						
ϑ_1 [°C]	10°C	-5°C	-5°C	-5°C	-36°C	38°C
z_1	1.000	1.000	4.050	4.230	1.000	1.000
Napětí ve vodiči						
σ_{h1} [MPa]	69.718	79.096	210.140	216.505	109.693	57.708
σ_{vB} [MPa]	4.209	4.208	17.055	17.813	4.208	4.210
Parametry řetězovky						
f_m [m]	3.10	2.73	4.17	4.22	1.97	3.75
Koncové síly lana						
F_H [kN]	3.505	3.976	10.564	10.884	5.514	2.901
F_{vB} [kN]	0.212	0.212	0.857	0.895	0.212	0.212

Obr. 65 – Výpočet stavových rovnic pro stavy definované v předloze příkladu [15]

V druhé polovině dialogového okna je potřeba zkontrolovat předdefinované stavy a doplnit hodnotu minimální a maximální teploty. Popřípadě je možné doplnit vlastní přitížení vodiče. Například může jít o přitížení získané z druhé části programu podle normy ČSN 33 3300 [4].

Zemní lano Fe						
ϑ [°C]	-36	-5	10	38	-5 *	-5 **
σ_{H1} [MPa]	109.687	79.095	69.718	57.710	216.557	210.032
σ_{dmax} [MPa]	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000
F_H [kN]	5.513	3.976	3.504	2.901	10.885	10.557
F_v [kN]	0.212	0.212	0.212	0.212	0.212	0.212

* Námraza, ** Vítr

Obr. 66 – Výsledné hodnoty dle [15]

Zatěžovací stav	σ_{H0} [MPa] ①	σ_{H0} [MPa] ②	Poměrná odchylka
-36°C	109,687	109,693	0,00%
-5	79,095	79,088	0,00%
+10	69,718	69,712	0,00%
+38	57,710	57,705	0,01%
-5°C + vítr	210,032	210,132	0,02%
-5°C + mráz	216,557	216,505	0,02 %

Obr. 67 – Porovnání výsledků

Nyní jsou zadány všechny potřebné údaje pro výpočet. Posledním krokem by byla kontrola přetížení vodiče, minimální a maximální teploty v záložce: „Účinky zatížení.“ V záložkách výsledky uživatel najde výsledné síly působící na stožár připravené pro další výpočty.

Z výše uvedených srovnání je patrné, že je program funkční. Vzhledem k tomu, že se jednalo o výjimečný případ řetězovky, kdy jsou oba závěsy na stejné výškové úrovni, byla vypracována příloha C, která dokazuje, že program funguje správně i pro případy nerovnoměrné řetězovky.

Porovnání výpočtu podle norem [3] a [4]

Byl proveden také výpočet zatížení a napětí v laně podle normy ČSN 33 3300 [4], (Obr. 69) a výsledky byly srovnány.

K největším rozdílům dochází při porovnání zatížením větrem. V tomto stavu se koncové síly liší téměř o 17% a průhyb o 7%. Při zatížení námrazou se liší koncové síly o 11,5% a průhyb o 5,4%. Při kombinovaném zatížení větrem a námrazou se účinky neliší o více než 1% (Obr. 68 a Obr. 69).

	Výchozí stav při měření	-5°C Referenční teplota	-5°C, vítr	-5°C, námraza	-36°C	+40°C	-5°C, vítr, normální námraza
Vstupní údaje							
ϑ_1 [°C]	10°C	-5°C	-5°C	-5°C	-36°C	40°C	-5°C
z_1	1.000	1.000	1.826	4.229	1.000	1.000	4.371
Napětí ve vodiči							
σ_{h1} [MPa]	69.71	79.09	121.02	216.48	109.68	57.04	221.44
σ_{vB} [MPa]	4.21	4.21	7.68	17.81	4.21	4.21	18.41
Parametry řetězovky							
f_m [m]	3.10	2.73	3.26	4.22	1.97	3.79	4.27

Obr. 68 – Výpočet podle normy ČSN EN 50 341

	Výchozí stav při měření	-5°C Referenční teplota	-5°C, vítr	-5°C, námraza	-36°C	+40°C	-5°C, vítr, normální námraza
Vstupní údaje							
ϑ_1 [°C]	10°C	-5°C	-5°C	-5°C	-36°C	40°C	-5°C
z_1	1.000	1.000	2.280	3.543	1.000	1.000	4.430
Napětí ve vodiči							
σ_{h1} [MPa]	69.71	79.09	141.31	191.68	109.68	57.04	223.46
σ_{vA} [MPa]	4.21	4.21	9.60	14.92	4.21	4.21	18.66
Parametry řetězovky							
f_m [m]	3.10	2.73	3.49	4.00	1.97	3.79	4.29

Obr. 69 – Výpočet podle normy ČSN 33 3300

Na velikost odchylky vlivem námrazy a větru má výrazný vliv námrazová a větrná oblast. Proto bylo provedeno rozšířené posouzení rozdílů účinků klimatických vlivů pro všechny oblasti (Příloha B).

Pozn.: Hodnota přetížení z vlivem větru se liší na Obr. 68 a Obr. 65Obr. 69, protože autorka bakalářské práce [15] nesprávně dosadila průměr zemního lana při výpočtu rovnoměrného zatížení větrem (str. 57). Do porovnání výsledků (Obr. 67) byla dosazena hodnota spočítaná autorkou [15], aby byla dokázána funkčnost této výpočetní pomůcky.

6.2 Varianta B

Pro praktickou ukázkou druhé výpočtové varianty byla vybrána bakalářská práce Martina Dostála [16]. Vyšetřovaným polem je třetí pole vedení.

Vstupní údaje:

Parametry lana:

Rozpětí $l = 300 \text{ m}$

Převýšení $h = 10 \text{ m}$

Dílčí součinitel zatížení:

Vítr $z = 2,029$

Námraza $z = 2,369$

Kombinace námrazy a větru $z = 2,695$

Výpočet vychází ze známého stavu, kterým je napětí $\sigma_{H0} = 90 \text{ MPa}$ při výchozím stavu.

Zatěžovací stav	$\sigma_{H0} \text{ [MPa]}$ ①	$\sigma_{H0} \text{ [MPa]}$ ②	Relativní odchylka
+40°C + vítr	68,65	68,19	0,67 %
-5°C + námraza	89,99	90,00	0,01 %
-30°C	51,58	52,03	0,86 %
+40°C	36,86	36,54	0,87 %
-5°C + vítr, námraza	99,47	99,49	0,02 %

① Výsledky podle předlohy [16]

② Výsledky podle programu vytvořeného v rámci této diplomové práce

Obr. 70 – Porovnání výsledků

Nejprve byly vyplněny parametry vodiče a zkontrolovány a upraveny zatěžovací stavy. Rozdíl oproti variantě A je v zadání napětí ve vodiči. Hodnotu nepočítáme, protože je dána výrobcem. Z normy [3] vyplývá, že jde o napjatost při teplotě -5°C a hodnotě přetížení vodiče, která odpovídá přetížení námrazou. Do sloupce: „Výchozí stav při měření,“ zadáme teplotu -5°C, přetížení vodiče námrazou a napjatost ve vodiči 90 MPa (Obr. 71).

Stejně jako v předchozím příkladu získáme průhyb, napětí ve vodiči a koncové síly. Z porovnání (Obr. 70) vyplývá, že program i pro tento typ úlohy funguje správně.

PARAMETRY VODIČE	
Plocha	$S = 267.80 \text{ m}^2$
Rozpětí prvního pole	$L_1 = 300 \text{ m}$
Výškový rozdíl podpěrných bodů	$h = 10 \text{ m}$
Šikmá vzdálenost podpor	$l_n = 300.17 \text{ m}$
Modul pružnosti	$E = 74733.56 \text{ MPa}$
Tíha vodiče	$g_1' = 7.698 \text{ N/m}$
Tíha vodiče	$\gamma' = 0.0287 \text{ N/(m3)}$
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha = 1.98 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

VÝPOČET PARAMETRŮ	
A	2.573
B	1.476

	Výchozí stav při měření	-5°C Základní stav	+40°C, vítr	-5°C, námraza	-30°C	+40°C	-5°C, vítr, normální námraza
Vstupní údaje							
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	-5°C	-5°C	40°C	-5°C	-30°C	40°C	-5°C
z1	2.369	1.000	2.029	2.369	1.000	1.000	2.695
Napětí ve vodiči							
$\sigma_{h1} [\text{MPa}]$	90.00	44.82	68.19	90.00	52.03	36.54	99.49
$\sigma_B [\text{MPa}]$	90.97	45.20	69.08	90.97	52.38	36.96	100.61
$\sigma_{VB} [\text{MPa}]$	13.25	5.82	11.06	13.25	6.06	5.55	14.98
Parametry řetězovky							
$f_m [\text{m}]$	8.52	7.22	9.64	8.52	6.22	8.86	8.77
$c [\text{m}]$	1321.69	1559.35	1169.11	1321.69	1809.86	1271.32	1284.25
$l_s [\text{m}]$	300.64	300.46	300.82	300.64	300.34	300.70	300.68
$x_a [\text{m}]$	106.05	98.11	111.14	106.05	89.75	107.73	107.30
$x_b [\text{m}]$	193.95	201.89	188.86	193.95	210.25	192.27	192.70
$z_a [\text{m}]$	1325.94	1562.43	1174.40	1325.94	1812.09	1275.89	1288.74
$z_b [\text{m}]$	1335.94	1572.43	1184.40	1335.94	1822.09	1285.89	1298.74
Koncové síly lana							
$F_H [\text{kN}]$	24.10	12.00	18.26	24.10	13.93	9.79	26.64
$F_B [\text{kN}]$	24.36	12.10	18.50	24.36	14.03	9.90	26.94
$F_{VB} [\text{kN}]$	3.55	1.56	2.96	3.55	1.62	1.49	4.01

Obr. 71 – Výpočet zatěžovacích stavů dle [16]

Pozn.: Autor práce [16] uvažoval jako druhý zatěžovací stav stejný stav jako výchozí. Pro úplnost byl ponechán. Díky tomu můžeme pozorovat, že jsou výsledky v prvním a čtvrtém sloupci stejné, čili nedochází k žádné chybě při zpětném přepočtu.

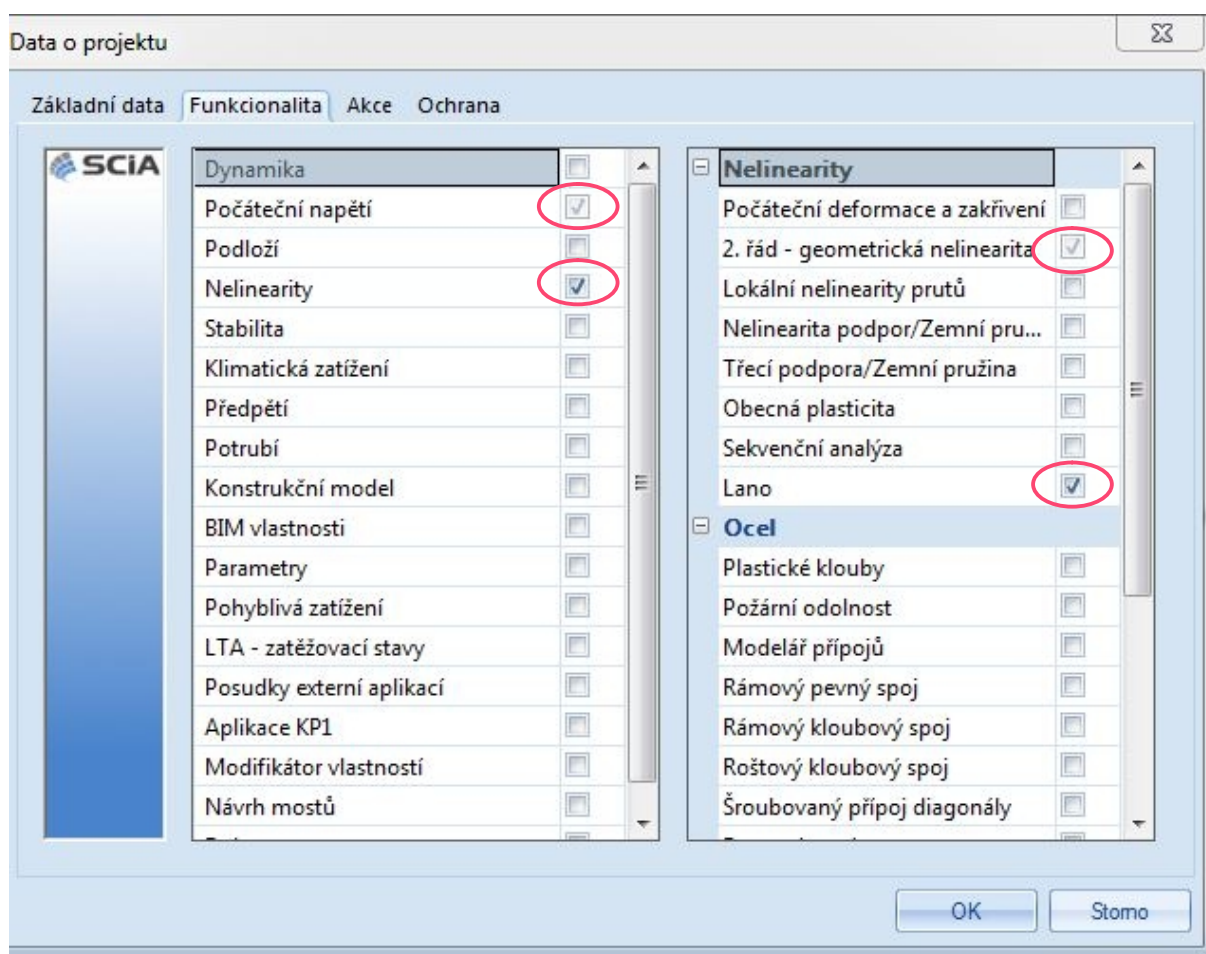
7 Ověření funkčnosti programu pomocí metody konečných prvků

Pro ověření funkčnosti byl zvolen modelový příklad. Podpěrné body jsou v jedné rovině, rozpětí $L = 300$ m, průhyb při teplotě -5°C je 5,6 m.

Parametry zvoleného lana:

Plocha	$S =$	50.24 mm ²
Průměr lana	$d =$	8 mm
Modul pružnosti	$E =$	210000 MPa
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha =$	0.000045 °K ⁻¹
Tíha vodiče	$g_1' =$	3.943 N/m
Tíha vodiče	$\gamma' =$	0.0785 N/(mm ² *m)

Úloha byla řešena v softwarovém systému Scia Engineer 16.1 [20]. Výpočtový model byl tvořen prostorovým rámem XYZ. V nastavení funkcionality projektu byla aktivována počáteční napětí a v podskupině nelinearity 2. řád a lano (Obr. 72).

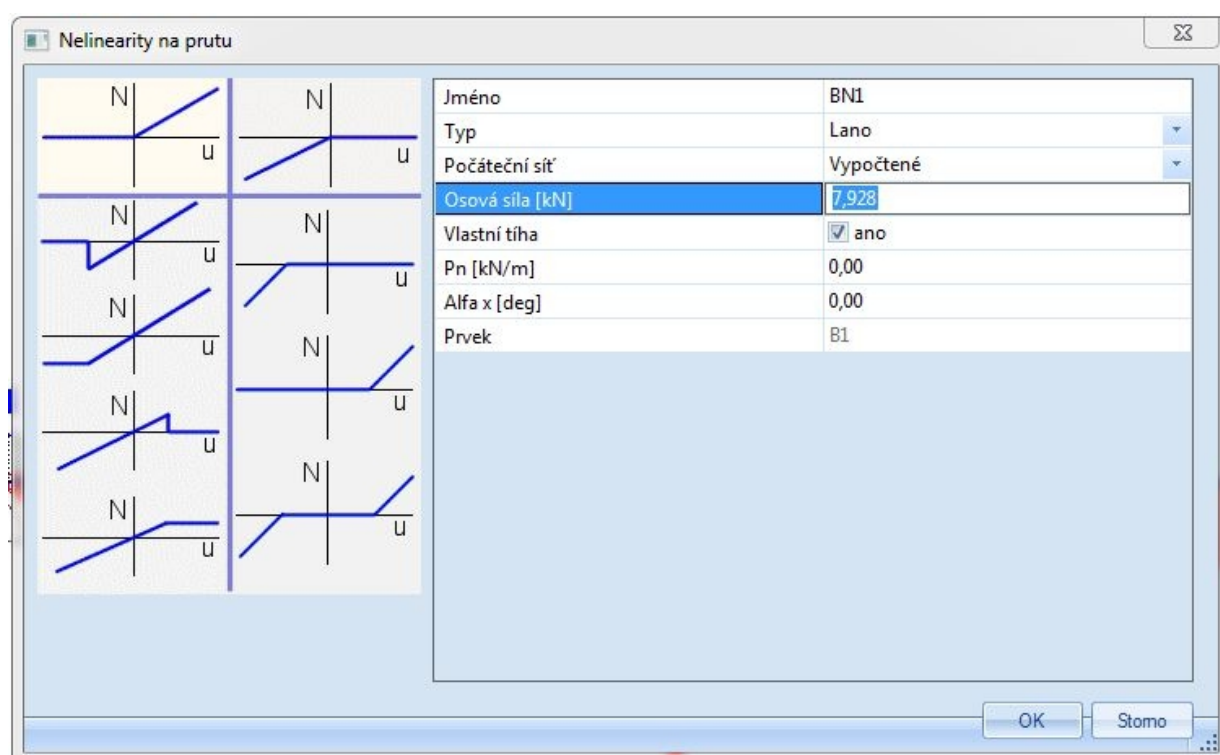


Obr. 72 – Data projektu

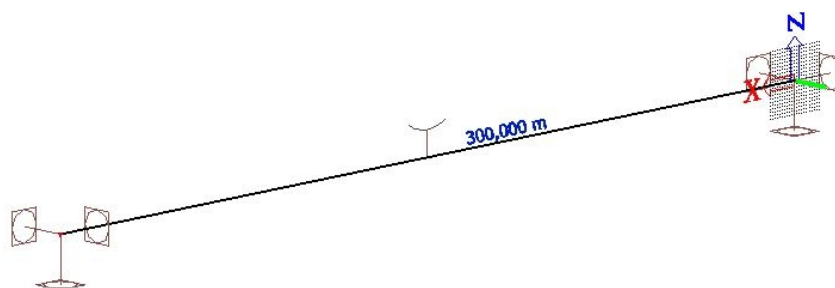
Byl vytvořen výpočtový model lana v podobě standardního prutového nosníku (Obr. 74), na který byla aplikována nelinearita typu lano (Obr. 73).

Ze zvoleného zadání známe průhyb od vlastní tíhy. Průhyb lana jako vstupní údaj můžeme zadat pomocí rovnoměrného zatížení a odpovídající síly předpětí. Náš zadaný průhyb odpovídá vlastní tíze nosníku, která je 3,94384 N/m. Pomocí vzorce (81) lze dopočítat sílu v laně H . Toto jsou vstupní parametry, kterými definujeme počáteční průhyb lana. Pokud známe průhyb, ale neznáme rovnoměrné zatížení, lze zatížení libovolně zvolit a odtud dopočítat vodorovnou sílu.

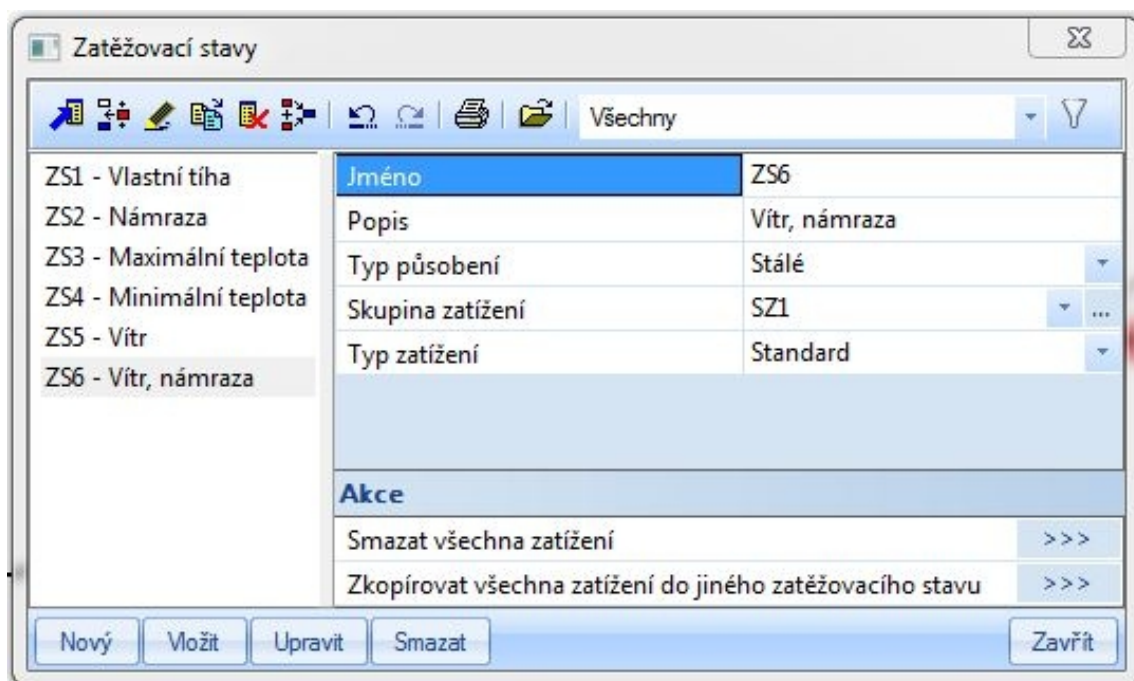
$$H = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f} = \frac{3,94 \cdot 300^2}{8 \cdot 5,6} = 7,923 \text{ kN} \quad (81)$$



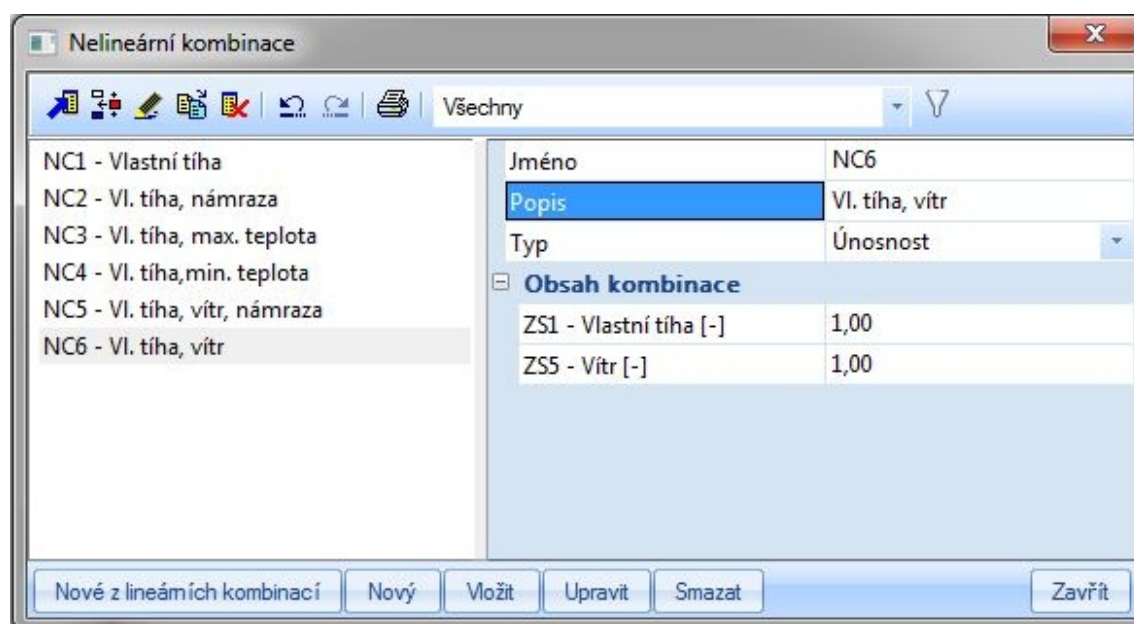
Obr. 73 – Nelinearity na prutu



Obr. 74 – Výpočtový model

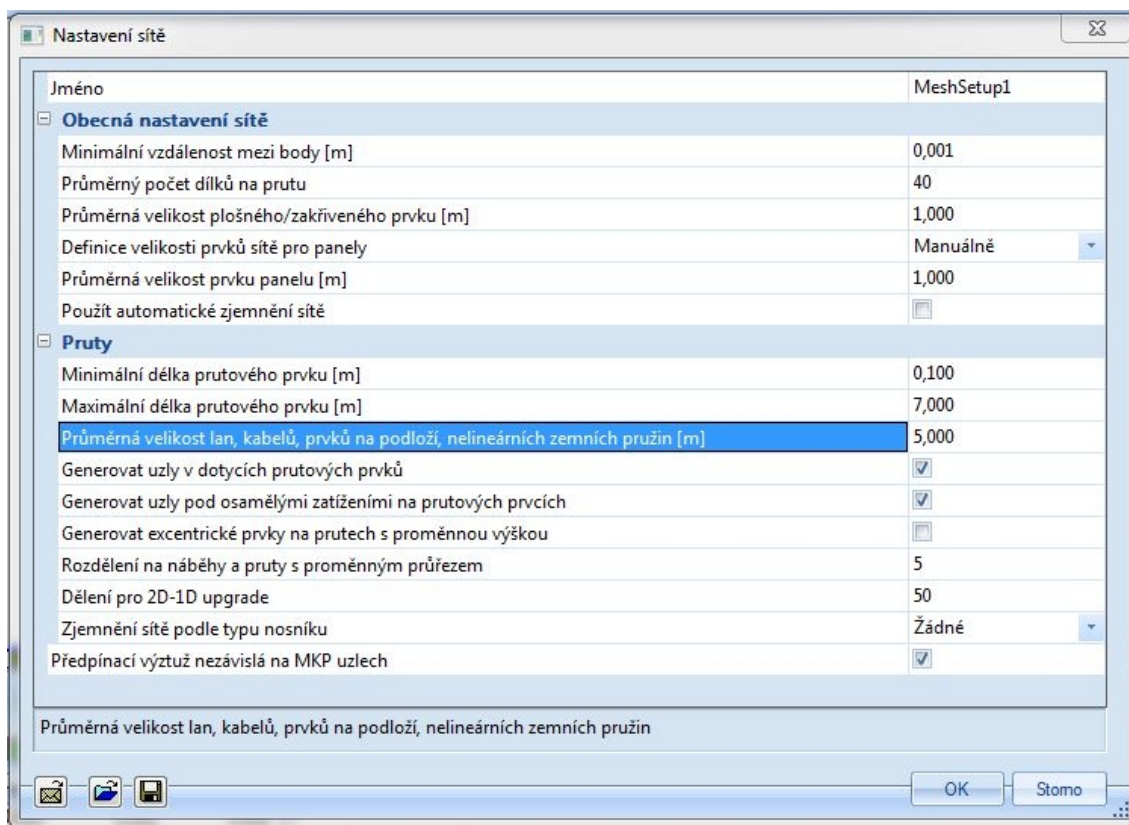


Obr. 75 – Zatěžovací stavy



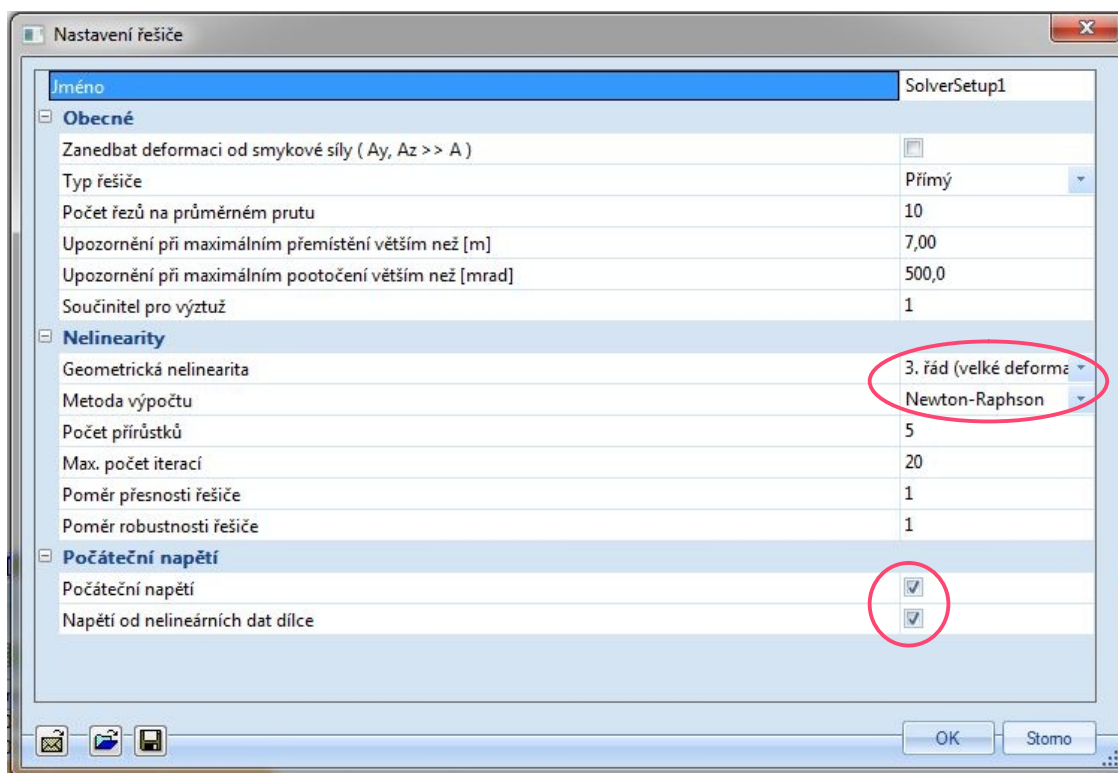
Obr. 76 – Nelineární kombinace

Pomocí nastavení parametrů lana jsme definovali počáteční průhyb nosníku. Nyní byla zadána jednotlivá zatížení (Obr. 75), vykreslení jednotlivých stavů je uvedeno v Příloze A. Pro zatížení námrazou, větrem, a jejich kombinací sloužily jako vstupní hodnoty odpovídající zatížení na metr vodiče z výpočtu zatížení. Námraza působí svisle v ose z, vítr vodorovně v ose y. Prut byl zatěžován maximální a minimální teplotou zadanou jako rozdíl teplot oproti teplotě vstupní.



Obr. 77 – Nastavení sítě

Vzhledem k rozměrům konstrukce bylo upraveno nastavení sítě, aby nedocházelo ke zbytečnému zvyšování výpočtového času (Obr. 77).



Obr. 78 – Nastavení řešiče

Byla použita Newton - Raphsonova metoda pro výpočet geometrické nelinearity 3. řádu. Před spuštěním výpočtu je nutné zapnout vstup počátečního napětí do výpočtu a napětí od nelineárních dat dílce (Obr. 78), jinak by data byla ignorována. Po provedení nelineárního výpočtu byly výsledky zapsány do tabulky (Obr. 80). Detaily o zatěžovacích stavech, průhybech a reakcích jsou umístěny v příloze A. Porovnání bylo shrnuto do tabulky (Obr. 80).

	Výchozí stav při měření	-5°C Referenční teplota	-5°C, vítr	-5°C, námraza	-30°C	+40°C	-5°C, vítr, normální námraza
Vstupní údaje							
ϑ_1 [°C]	10°C	-5°C	-5°C	-5°C	-30°C	40°C	-5°C
z_1	1.000	1.000	1.267	2.685	1.000	1.000	2.919
Napětí ve vodiči							
σ_{h1} [MPa]	126.16	157.83	186.67	315.20	267.23	93.45	333.90
σ_B [MPa]	126.71	158.27	187.27	316.79	267.49	94.19	335.67
σ_{VB} [MPa]	11.79	11.79	14.94	31.67	11.78	11.81	34.43
Parametry řetězovky							
f_m [m]	7.01	5.60	6.00	7.53	3.31	9.46	7.73
Koncové síly lana							
F_H [kN]	6.338	7.929	9.378	15.836	13.426	4.695	16.775
F_{VB} [kN]	0.592	0.592	0.750	1.591	0.592	0.593	1.730

Obr. 79 – Výsledky stavové rovnice

Stejná úloha byla řešená pomocí vypracovaného Excelu (Obr. 79) a výsledky porovnány s hodnotami získanými MKP výpočtem (Obr. 80).

Kombinace		Průhyb			Reakce					
		f_m [m]			R_B [kN]			R_x [kN]		
Ozn.	Obsah	Scia	Excel	R.O.	Scia	Excel	R.O.	Scia	Excel	R.O.
NC1	Vlastní tíha	5.60	5.60	0.00%	0.595	0.592	0.50%	7.906	7.929	0.29%
NC2	VI. tíha, námraza	7.53	7.53	0.00%	1.589	1.591	0.13%	15.782	15.836	0.34%
NC3	VI. tíha, max. teplota	9.46	9.46	0.00%	0.591	0.593	0.34%	4.672	4.695	0.49%
NC4	VI. tíha, min. teplota	3.26	3.27	0.31%	0.596	0.592	0.67%	13.350	13.426	0.57%
NC5	VI. tíha, vítr, námraza	7.72	7.73	0.13%	1.727	1.730	0.17%	16.705	16.775	0.42%
NC6	VI. tíha, vítr	6.00	6.00	0.00%	0.750	0.750	0.00%	9.355	9.378	0.25%

R.O. - Relativní odchylka

Obr. 80 – Porovnání výsledků z Excelu a Scia Engineer

Výsledky se liší zhruba o 0,5% oproti numerickému řešení (Obr. 80), proto je dokázána platnost řešení.

8 Závěr

V rámci diplomové práce jsem sestavila algoritmus pro výpočet sil působících na stožár podle dostupné literatury a normových předpisů. Jako výpočtové prostředí jsem zvolila tabulkový procesor Microsoft Excel [18]. Při tvorbě výpočtové pomůcky jsem kladla důraz na příznivé uživatelské prostředí, transparentnost výpočtů, které usnadňují průběžnou kontrolu a možnost editace součinitelů. Výpočty jsou v souladu s normou pro návrh elektrických vedení ČSN EN 50 341 [3] a normou pro návrh konstrukcí ČSN EN 1991 [1].

Předmětem práce je zejména problematika vyšetřování účinků lan na základě známého průvěsu. Pro zjištění aktuální napjatosti ve vodiči z těchto okrajových podmínek byl sestrojen algoritmus, který je funkční i pro případy nesouměrně umístěných podpěrných bodů. S využitím stavové rovnice dokáže určit zatížení pro normou definované stavy. Tyto stavy jsou výhodné zejména pro posouzení vodičů. Ze statického hlediska je výhodnější znát účinky jednotlivých zatížení, proto byl vytvořen algoritmus sloužící k jejich separaci. Výstupy programu jsou účinky působící vlivem jednotlivých zatížení na řešený stožár. Součástí výpočetní pomůcky jsou listy pro usnadnění výpočtu klimatických zatížení, tj. zatížení větrem, námrazou a jejich kombinací.

Práce obsahuje také část sloužící k výpočtu klimatických zatížení podle aktuálně neplatné normy ČSN 33 3300 [4]. Tato pomůcka usnadňuje porovnání požadavků na únosnost stožáru podle původní a nové normy. V příloze B je dostupné porovnání nároků, které kladou normy [3] a [4] na konstrukce.

Program je použitelný pro všechny typy stožárů venkovního vedení, přestože u některých druhů je potřeba využít principu superpozice.

Výpočetní pomůcku lze využít k řešení dvou základních druhů úlohy. První varianta vychází z hodnoty napětí v laně předepsané pro nultý stav, který odpovídá teplotě -5°C a námraze. Je ale možno zadat libovolné napětí pro známý zatěžovací stav. Tento postup je vhodný pro nový návrh vedení a pro výpočet vlastních zatěžovacích stavů na základě projektové dokumentace. Druhou možností je výpočet z hodnot naměřených v terénu. Hlavním vstupním parametrem je maximální průhyb lana a teplota prostředí. Využití nachází hlavně při posouzení stávajícího vedení na základě geodetického měření.

V diplomové práci je uveden také přehledný manuál pro usnadnění orientace v programu a seznámení uživatele s možnostmi jeho využití. Práce je obohacena o ukázky řešení příkladů převzatých z bakalářských prací [15], [16]. Tím je znázorněno použití

programu krok za krokem při řešení obou variant úlohy. Výsledky řešených příkladů (Obr. 67), (Obr. 70) lze zároveň považovat za verifikaci funkčnosti algoritmů implementovaných do výpočetního programu. Funkčnost pomůcky pro případ nesouměrné řetězovky je ověřena pomocí příkladu ze skript [12]. Výpočet je přiložen v příloze C.

K potvrzení správnosti řešení byl také vytvořen numerický model v programu Scia Engineer [20]. Lano bylo vymodelováno jako obyčejný nosník a program [20] nabízí použití nelinearity, která jej převede na lanový prvek s téměř nulovou ohybovou tuhostí. Lze modelovat dva lanové prvky – lano přímé nebo nenapnuté. V této práci bylo zvoleno lano nenapnuté, což umožňuje aplikovat zatížení na deformované lano. Reakce a průhyb byly porovnány s výstupy programu (Obr. 80).

Na základě výše zmíněných porovnání vyplývá, že je program funkční a dostatečně přesný. Lze ho tedy použít pro návrh i posouzení stávajících stožárů venkovního elektrického vedení a snížit tak čas potřebný k analýze účinků vodičů.

Literatura

- [1] ČSN EN 1991-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí*. 2004.
- [2] ČSN EN 50341-3/Z2. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV: Část 3: Soubor Národních normativních aspektů*. 2002.
- [3] ČSN EN 50341-1 ED.2. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV: Část 1: Všeobecné požadavky - Společné specifikace*. 2004.
- [4] ČSN 33 3300. *Elektrotechnické předpisy.: Stavba venkovních silových vedení*. 1984-2002.
- [5] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. 2015. Brno.
- [6] KADLČÁK, Jaroslav. *Statics of suspension cable roofs*. 2015. Rotterdam: Balkema, 1995. ISBN 90-541-0618-2.
- [7] BUCHHOLDT, Hans Anton. *An Introduction to Cable Roof Structures*. Second edition. London: Thomas Telford Ltd, 1999. ISBN 0-7277-2624-2
- [8] *Electrical Edition: Online Electrical Engineering Magazine* [online]. 2016 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.electricaledition.com>
- [9] LEHPAMER, Harvey. *Transmission systems design handbook for wireless networks*. Boston, MA: Artech House, c2002. ISBN 1-58053-243-8
- [10] *TZB-info: stavebnictví, úspora energií, technická zařízení budov* [online]. 2016 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/>
- [11] *Electrical4u.com: ONLINE ELECTRICAL ENGINEERING STUDY SITE* [online]. 2016 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.electrical4u.com>
- [12] OTČENÁŠOVÁ, Alena. *Mechanika vonkajších silových vedení*. EDIS, 2010, 236 s. ISBN 9788055401812.
- [13] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí*. 3. vyd. Brno: Vutium, 2007, 236 s. ISBN 978-80-214-3419-6.
- [14] ABRAMOWITZ, M. a I. A. STEGUN. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 9th printing. New York: Dover, 1972, 880 s. ISBN 978-80-214-3419-6.

- [15] DYBALOVÁ, Veronika. *Rekonstrukce ocelových příhradových stožárů elektrického vedení VN 180/94 v Třebovicích* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/113881>. VŠB-TU. Vedoucí práce Vít Křivý.
- [16] DOSTÁL, Martin. *Dimenzování vodičů venkovního vedení podle ČSN EN 50341 a ČSN EN 50423* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=51894. VUT. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.
- [17] Porovnání nadzemního a kabelového vedení. *ČEZ: Distribuce* [online]. [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/vedeni-110-kv-novy-bor-varnsdorf/porovnani-reseni-nadzemniho-a-kabeloveho-vedeni.html>

Použitý software

- [18] *Microsoft Office: Excel 2007* [Software]. [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <https://products.office.com/cs-cz/excel>
- [19] *Microsoft Office: Word 2007* [Software]. [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <https://products.office.com/cs-cz/excel>
- [20] *Scia A NEMETSCHEK COMPANY: Scia Engineer v.16.1* [Software]. [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <https://www.scia.net>
- [21] *Graphisoft A NEMETSCHEK COMPANY: Archicad 18* [Software]. [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <http://www.graphisoft.com/archicad/>

Seznam příloh

- A - Zatížení působící na model a vnitřní síly lana modelovaného v programu Scia Engineer
- B - Porovnání výpočtu klimatických zatížení podle norem ČSN 33 3300 a ČSN EN 50 341
- C - Ověření funkčnosti programu

Poděkování

Tímto bych ráda vyjádřila své poděkování za pomoc a poskytnuté konzultace vedoucímu své práce Ing. Ivanu Kološovi, Ph.D. A také doc. Ing. Vítovi Křivému, Ph.D. a doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za pomoc při poskytnutí podkladů.